

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)

669.18
С568

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ СТАЛИ

Материалы
XVII Международной конференции
Часть вторая
Под редакцией В.Е. Рощина

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2017

УДК 669.187(063)

C568

Одобрено

советом факультета материаловедения и металлургических технологий

C568 **Современные проблемы электрометаллургии стали:** материалы XVII Международной конференции: в 2 ч. / под ред. В.Е. Рощина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Ч. 2. – 223 с.

ISBN

ISBN

В сборник материалов конференции вошли тексты докладов, представленных авторами для обсуждения на заседаниях секций. Они дают представление о научных, технологических и проектно-конструкторских разработках в области теории и технологии производства стали, ферросплавов, а также конструкции агрегатов и цехов.

Отпечатано с авторских оригиналов.

УДК 669.187(063)

ISBN

ISBN

© Издательский центр ЮУрГУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗЛИВКА И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ, СТРУКТУРА И КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА

<i>Бирюков А.Б., Иванова А.А.</i> Математическое моделирование теплового состояния заготовки, формирующейся в кристаллизаторе, с использованием системы диагностики теплотехнических процессов.....	3
<i>Демченко А.И., Корзун Е.Л., Неваленный С.Ю., Бурда А.В., Кузнецов А.Ю., Чернышов Е.А.</i> Повышение качества литого цилиндрического слитка жаропрочного сплава INCONEL 718 в условиях ПАО «РУСПОЛИМЕТ».....	10
<i>Еременко Ю.И., Полещенко Д.А.</i> Разработка алгоритма принятия решения об отсечке шлака при разливке стали.....	14
<i>Кириличев М.В., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Гаманюк С.Б., Бодренко Е.А.</i> Физическое моделирование влияния жидко-твердой разливки на процесс затвердевания крупных слитков.....	20
<i>Кожухов А.А., Смирнов Е.Н., Черменев Е.А., Скляр В.А., Короткова Л.Н.</i> Разработка физической модели для исследования гидродинамики потоков металла в промежуточном ковше МНЛЗ.....	30
<i>Смирнов Е.Н., Белевитин В.А., Скляр В.А.</i> Математическое моделирование формирования затвердевающей оболочки непрерывнолитого блюма.....	36
<i>Числавлев В.В., Фейлер С.В., Бойков Д.В., Неунывахина Д.Т.</i> Гидродинамические процессы в промежуточном ковше при непрерывной разливке рельсовой стали.....	41
<i>Смирнов Е.Н., Ручко В.Н., Скляр В.А., Соболев А.Г.</i> Исследование влияния фактора взаимного расположения участков «изгиба и правки» и «мягкого» обжата на напряженно-деформированное состояние непрерывнолитой заготовки.....	52
<i>Сотников А.Л.</i> Принципы обеспечения точности конструктивных параметров сортовой МНЛЗ.....	57
<i>Толстых Д.С., Дуб В.С., Тохтамышев А.Н., Иванов И.А., Мальгинов А.Н.</i> Влияние конфигурации изложницы на гидродинамику расплава на прозрачных холодных моделях.....	66
<i>Чубуков М.Ю., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Усков Д.П.</i> Особенности строения НЛЗ для трубных сталей различных классов.....	72
<i>Костина М.В., Блинов Е.В., Мурадян С.О., Ригина Л.Г.</i> Структура и свойства новых высокопрочных азотосодержащих аустенитных Cr-Ni-Mn-Mo-N сталей в зависимости от способа их получения и обработки..	79
<i>Левков Л.Я., Дуб В.С., Киссельман М.А., Шурыгин Д.А., И.А. Иванов, Терехин Д.К.</i> Физическая и структурная однородность полого слитка ЭШП – основа высокого качества продукции ответственного назначения	88

"OEMK", studied the characteristics of temperature change over the cross section of the bloom, the dynamics of the growth the solid shell, the volume of the hardened component and the position of the point the end solidification, depending on the technological parameters of continuous casting for the steel grades 09G2S, 40X and 70. The obtained data about the thickness of crystallized shell continuous cast bloom and the ratio between solid and liquid phases depending on the casting speed and the steel grade is allowed to make a conclusion about the possible place of installation module of "soft" reduction in case of realization this technology is applicable to the conditions of the bloom casting on continuous casting machine. The simulation results are in digital form can be transmitted in the strength deformation model of the continuous cast bloom on the stage of incomplete crystallization.

Key words: "soft" reduction, steel, continuous cast bloom, mathematical modelling, thermal state, crystallization.

References

1. Terchelli, K. *Nepreryvnoe lit'e bljumov s mjagkim dinamicheskim ob-zhatiem na zavode firmy Posco, Koreja* / K. Terchelli, D. Disaro // *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tehnologija*. – 2010. – № 1. – S. 15–21.
2. Smirnov, A.N. *Nepreryvnaja razlivka stali* / A.N. Smirnov, S.V. Kuber-skij, E.V. Shtepan. – Doneck: DonNTU, 2011. – 482 s.
3. Basak, I.O. *Vlijanie rezhima mjagkogo obzhatija na makrostrukturu nepreryvnolityh sljabov raznoj tolshhiny* / I.O. Basak // *TiTMP*. – 2015. – №1, (16). – S.44–47.
4. Fedosov, A. V. *Issledovanie deformacii tverdoj korki stali, for-mirujushhejsja v kristallizatore sljabovyh MNLZ* / A.V. Fedosov, V.I. Burlakov, S.V. Larionova // *GVUZ «Priazovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet»*. – 2011. – №22. – S.76–81.
5. Smyrnov, Y.N. *Physical and computer modeling of a new soft reduction process of continuously cast blooms* Y. Smyrnov, V. Belevitin, V. Skliar, G. Orlov // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2015. – Vol. 50. – R. 589–594.
6. Gerbcth, G. *Liquid metal modelling of continuous steel casting* / G. Gerbcth, S. Fxkcr, K. Timmel, X. Miao // *TMS Annual Meeting*/ – 2010. – P. 55–62.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

В.В. Числавлев, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков, Д.Т. Неунывахина

(СибГИУ; ЕВРАЗ ЗСМК, г. Новокузнецк, Россия)

chisl.vv@yandex.ru

Проведено физическое и математическое моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше четырехручьеваой машины непрерывного литья заготовок. Для проведения исследований, основываясь на теории подобия, разработан лабораторный экспериментальный комплекс, основным элементом которого является физическая модель промежуточного ковша блюмовой машины

непрерывного литья заготовок АО «ЕВРАЗ ЗСМК», выполненная из органического стекла в масштабе 1:2,5. Модели огнеупорных элементов для организации потоков металла выполнены с использованием FDM-технологии 3D-печати. Для подтверждения адекватности результатов, полученных при физическом моделировании, проведено математическое моделирование. В результате проведенных экспериментальных исследований выполнены качественная оценка процессов перемешивания металлического расплава при непрерывной разливке, количественная оценка объема застойных зон с использованием метода RTD, оценена эффективность рафинирования металла от неметаллических включений в промежуточном ковше при использовании моделей огнеупорных элементов различных вариантов конфигурации. Установлено, что использование полнопрофильных перегородок с отверстиями позволяет обеспечить гомогенизацию металлического расплава и значительно снизить объем застойных зон в промежуточном ковше.

Разработаны рекомендации по конструктивным параметрам полнопрофильных огнеупорных перегородок промежуточного ковша для обеспечения рафинирования металлического расплава от неметаллических включений.

Ключевые слова: качество стали, неметаллические включения, физическое моделирование, математическое моделирование, промежуточный ковш, непрерывная разливка стали, огнеупорные элементы.

Введение

Успех в реализации металлопродукции определяется не только её соответствием государственным и международным стандартам, но и дополнительными требованиями, предъявляемыми заказчиками к качеству стали ответственного назначения, в частности, к рельсовому металлу. В работах, выполненных специалистами ОАО «ВНИИЖТ», ИМет РАН и ОАО «УИМ» [1-5], отмечается, что эксплуатационная стойкость рельсов в пути в значительной степени зависит от чистоты стали по неметаллическим включениям. Причиной образования контактно-усталостных дефектов, как правило, служат крупные оксидные и нитридные недеформируемые неметаллические включения [5]. Рафинирование расплава от неметаллических включений осуществляется во время внепечной обработки и при непрерывной разливке стали. При этом эффективность мероприятий, реализуемых в процессе внепечной обработки, может быть увеличена при обеспечении условий рафинирования стали в процессе непрерывной разливки [6].

В связи с тем, что промежуточный ковш является последней футерованной ёмкостью, где металл находится в жидком состоянии, целесообразным является обеспечение в нем рафинирования металла от докристаллизационных неметаллических включений. Условия рафинирования металла в промежуточном ковше во многом определяются гидродинамическими процессами, которые обуславливают распределение и динамику движения металлического расплава и неметаллических включений.

Гидродинамические процессы, в свою очередь, определяются конфигурацией внутреннего объема промежуточного ковша, которую возможно изменять

путем установки специальных огнеупорных элементов с определенными геометрическими параметрами, оптимизированными под условия и параметры процесса непрерывной разливки стали.

Цель исследования

Для оценки эффективности и совершенствования конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнен комплекс исследований гидродинамических процессов.

Методика исследования

Для проведения физического моделирования разработан лабораторно-экспериментальный комплекс (рис. 1) [7], основным элементом которого является физическая модель промежуточного ковша, выполненная из прозрачного органического стекла в масштабе 1:2,5 с обеспечением подобия исследуемых процессов. В качестве моделирующей жидкости используется вода, поскольку кинематическая вязкость воды при комнатной температуре и жидкой стали при температурах разливки близки по своим значениям.

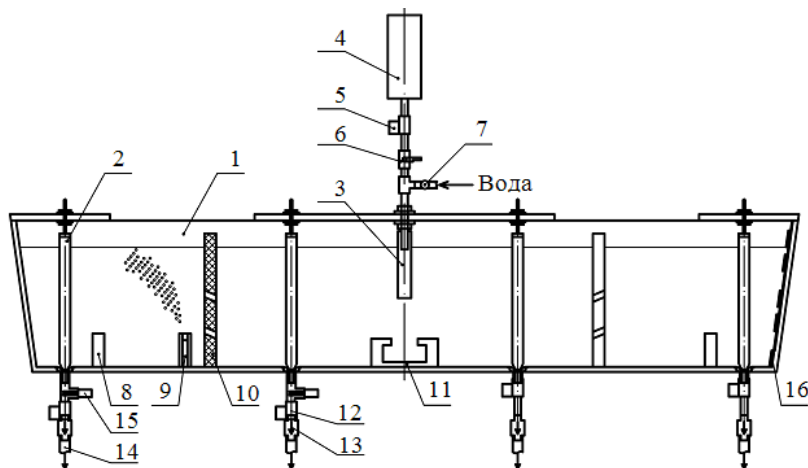


Рис. 1. Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше: 1 – модель промежуточного ковша; 2 – стопор; 3 – труба подвода моделирующей жидкости; 4 – резервуар для красителя (солевого раствора); 5 – электромагнитный клапан (нормально-закрытый) для подачи красителя; 6 – кран; 7 – вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости; 8-11 – модели рафинирующих устройств; 12 – электромагнитный клапан (нормально-открытый) для отвода воды; 13 – расходомеры; 14 – линии отвода моделирующей жидкости; 15 – датчики солемера; 16 – датчики уровня моделирующей жидкости

Визуализация потоков жидкости осуществляется вводом в струю воды индикатора (красителя). В качестве красителя используется водный раствор перманганата калия (KMnO_4) концентрацией 3 г/л. Информацию о направлении и скорости движения потоков жидкости в различных областях промежуточного ковша и минимальном времени пребывания моделирующей жидкости при различных технологических параметрах процесса и конструкции промежуточного ковша получали путем обработки видеоматериала с получением кинограмм. Оценка степени гомогенизации жидкости, уточнение минимального времени

пребывания моделирующей жидкости в объеме промежуточного ковша и определение объема застойных зон осуществляется кондуктометрическим методом. В качестве индикатора используется раствор хлорида натрия. Измерение электрической проводимости и содержания NaCl в воде производится солемером PS202, датчики которого установлены в разливочных стаканах модели промежуточного ковша. При этом показания солемера непрерывно регистрируются.

Физические модели огнеупорных элементов были реализованы методом послойного моделирования (FDM) с помощью технологии 3d-печати (рис. 2), что позволило обеспечить точность геометрических параметров моделей.

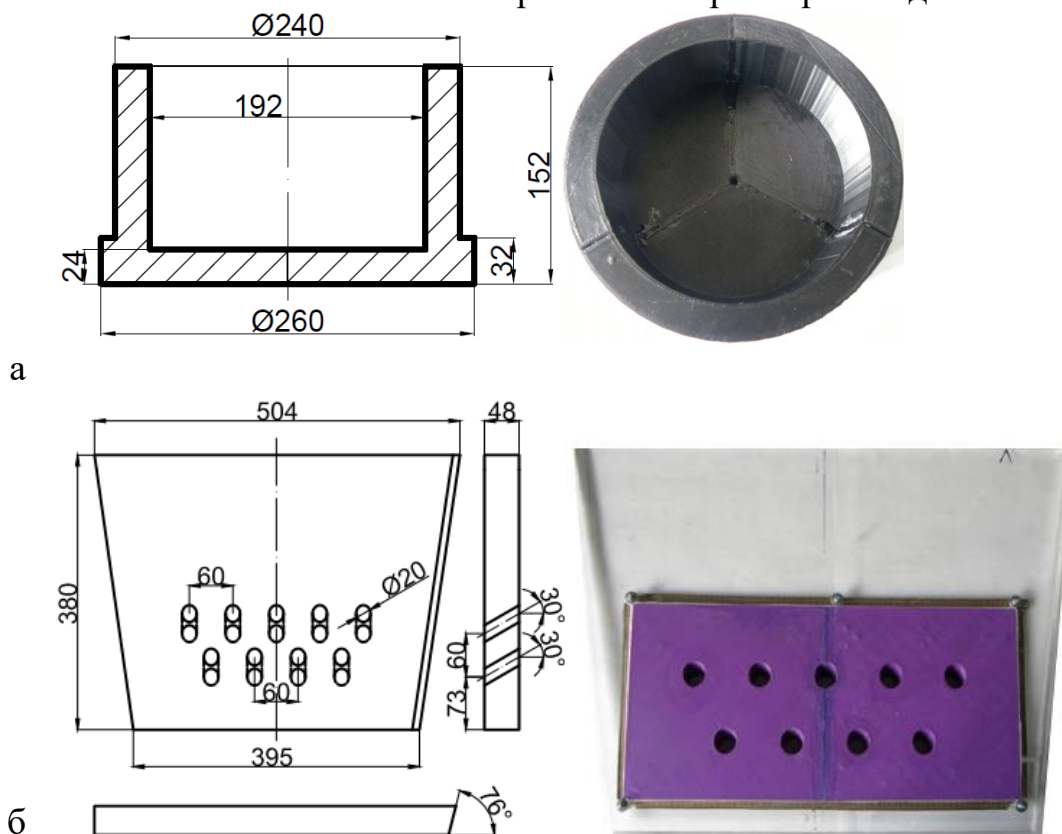


Рис. 2. Модели огнеупорных элементов промежуточного ковша: а – струегаситель; б – полнопрофильные перегородки

Исследование гидродинамики металла проводили для условий разливки стали со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу и получением заготовки сечением 300×360 мм.

Моделирование проводили при различных вариантах конструкции промежуточного ковша:

без огнеупорных элементов (базовый вариант);

с установкой струегасителей, различной высоты (рисунок 2, а): А) 64 мм; Б) 96 мм; В) 128 мм;

с установкой полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями, направляющими поток моделирующей жидкости к поверхности под углом 30°, различных конфигураций (рисунок 2, б): А) диаметр всех отверстий 20 мм; Б)

отверстия нижнего ряда диаметром 20 мм, верхнего – 32 мм; В) отверстия нижнего ряда диаметром 32 мм, верхнего – 40 мм.

Оценку эффективности конфигурации промежуточного ковша для обеспечения рафинирования металлического расплава от неметаллических включений осуществляли при использовании метода исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (RTD).

Для определения значений скорости потоков металлического расплава в объеме промежуточного ковша использовали методы вычислительной гидродинамики на разработанной математической модели [8,9], при этом в качестве индикатора использовали жидкость с физическими характеристиками, аналогичными жидкой стали. По условиям моделирования ввод индикатора осуществляется в течение 5 секунд, затем непрерывно поступает поток жидкой стали.

Результаты исследования

Установлено, что при базовом варианте конструкции промежуточного ковша время достижения центрального и периферийного разливочных стаканов составляет 4 и 33 секунды соответственно (рис. 3).

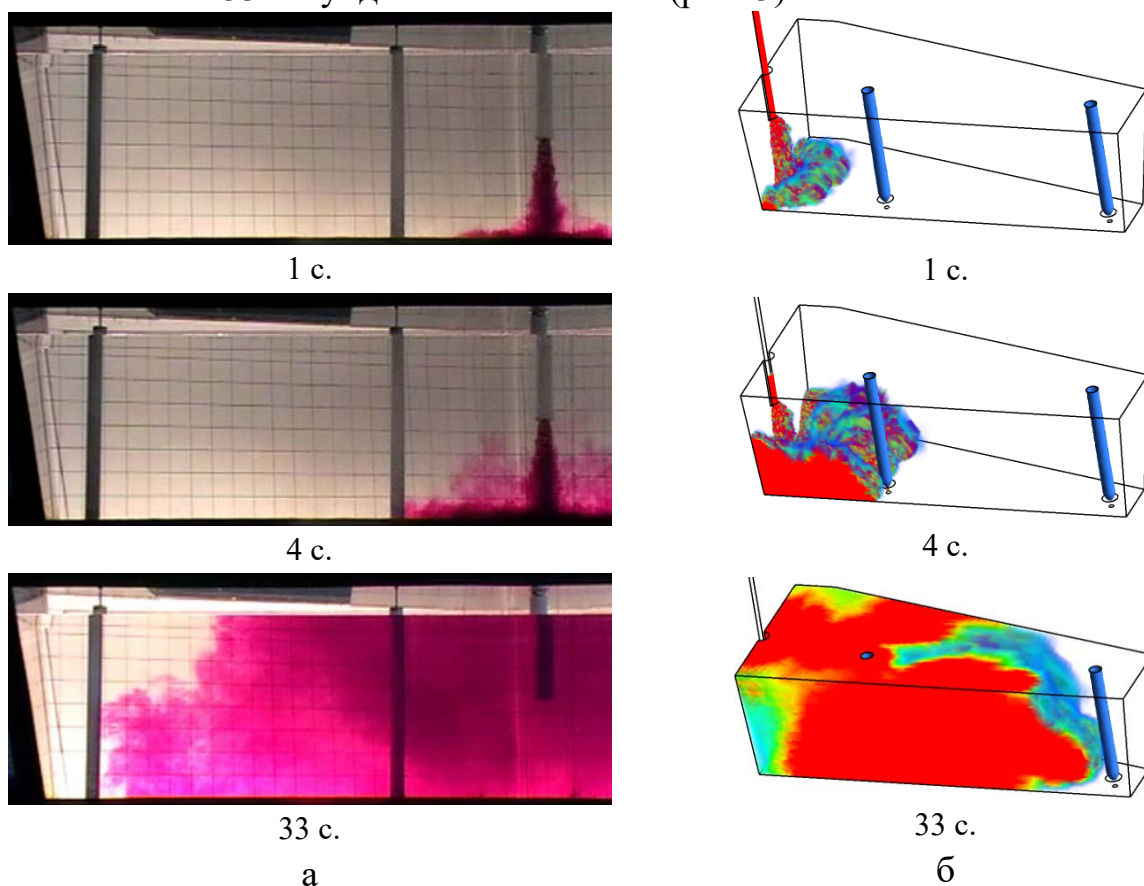


Рис. 3. Гидродинамическая картина в промежуточном ковше базовой конструкции, полученная методами физического (а) и математического моделирования (б)

Достижение потока центральных разливочных стаканов осуществляется за короткий временной интервал, образуя при этом «короткие» пути, что в промышленных условиях приводит к попаданию докристаллизационных неметал-

лических включений, транспортируемых потоком металла, в кристаллизатор и далее в непрерывнолитую заготовку.

Дальнейшие исследования гидродинамики металла в промежуточном ковше проводили с использованием струегасителей и полнопрофильных перегородок различной конфигурации. Результаты исследований в характерные моменты времени (достижение разливочных стаканов) представлены на рис. 4. При попадании моделирующей жидкости в объем струегасителя происходит подавление части энергии струи за счет циркуляции (рис. 4, 5), после чего поток направляется к поверхности, отражается и направляется к разливочным стаканам (рис. 4, а). В результате циркуляции в ограниченном объеме скорость гидротоков в объеме промежуточного ковша уменьшается. При таком режиме течения наблюдается уменьшение области с активными завихрениями, снижение турбулентности и, как следствие, увеличение минимального времени пребывания порции металла в промежуточном ковше.

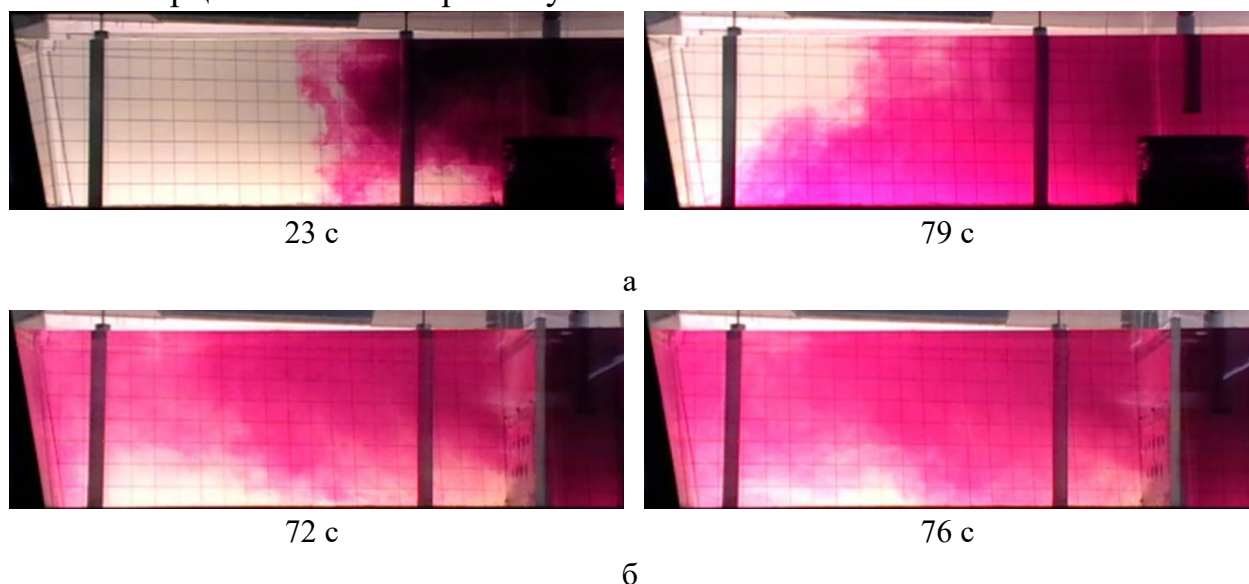
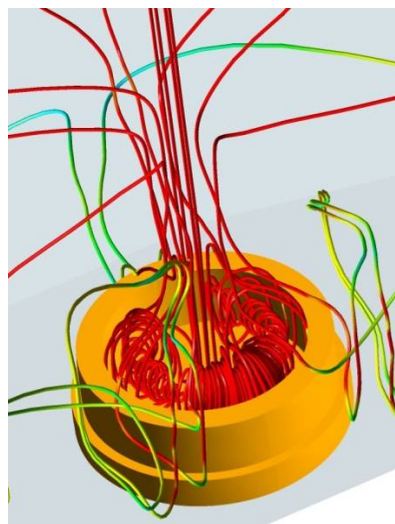


Рис. 4. Гидродинамическая картина в промежуточном ковше: а – с использованием струегасителя; б – с использованием полнопрофильных перегородок

При установке полнопрофильных перегородок происходит разделение промежуточного ковша на 3 камеры (одну приемную и две разливочные). В приемной камере происходит активная циркуляция моделирующей жидкости, через переливные отверстия поток поступает в разливочные камеры (рис. 4, б). Струи, проходящие через отверстия, в перегородках направляются к поверхности и достигают её в области центральной части разливочной камеры между стопорами. При достижении поверхности происходит условное разделение основного потока на две части. Одна часть движется вдоль поверхности и, доходя до торцевых стенок, устремляется к периферийным разливочным стаканам и далее движется с меньшей скоростью в придонных слоях вблизи задних стенок к центральным разливочным стаканам. Другая, отраженная от поверхности часть основного потока, направляется к центральному разливочному стакану.



а



б

Рис. 5. Гидродинамические процессы в объеме струегасителя при физическом (а) и математическом (б) моделировании

На рис. 6 представлены значения времени достижения порции модельной жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов для исследуемых вариантов. Из приведенных данных видно, что при использовании моделей полнопрофильных перегородок с отверстиями нижнего ряда диаметром 20 мм и верхнего ряда 32 мм (вариант 3Б) время достижения центральных и периферийных разливочных стаканов различается на 4 с, что свидетельствует об активной циркуляции моделирующей жидкости, ее гомогенизации и отсутствии «коротких» путей.

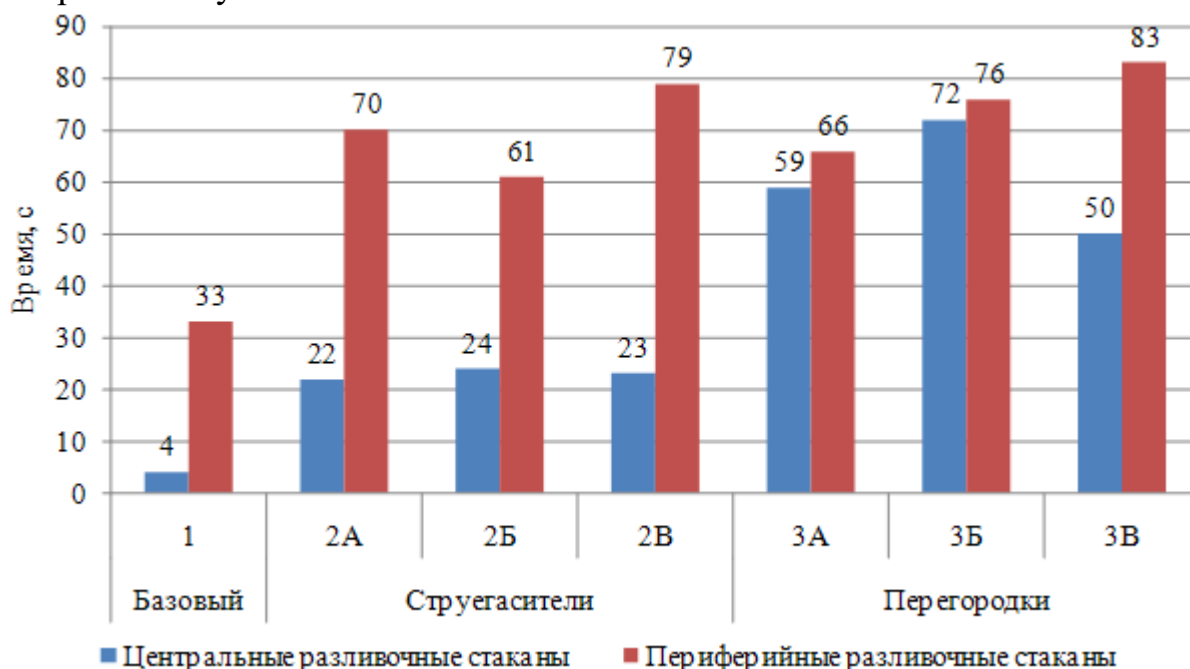


Рис. 6. Минимальное время достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов при использовании различных моделей огнеупорных элементов

Анализ результатов моделирования, полученных кондуктометрическим методом, позволяет сделать вывод о том, что объем застойных зон в промежуточном ковше базового варианта конструкции составляет ~28 % (рис. 7), а наличие «короткого» пути к центральным разливочным стаканам не позволяет обеспечить в полной мере гомогенизацию металлического расплава по химическому составу и температуре, а также рафинирование металлического расплава от неметаллических включений. Требуется применение дополнительных огнеупорных элементов для организации движения потоков металла, увеличения минимального времени пребывания порции металла в объеме промежуточного ковша и создания зон активной циркуляции расплава и уменьшения объема застойных зон.

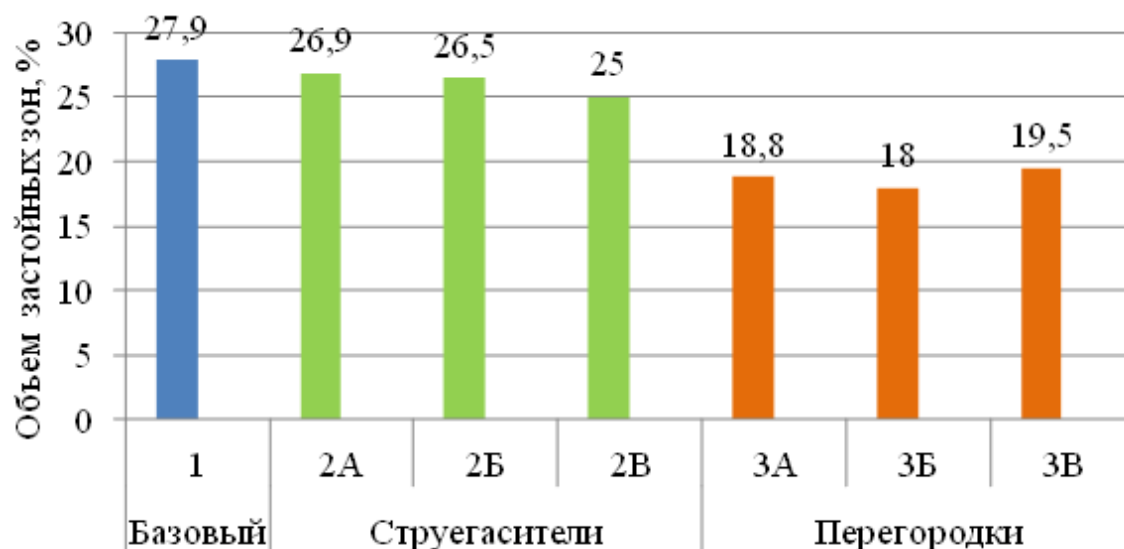


Рис. 7. Объем застойных зон, %

Использование струегасителя позволяет значительно увеличить время пребывания порции моделирующей жидкости в объеме модели промежуточного ковша до 23 и 79 с для центральных и периферийных ручьев соответственно (рис. 4 а, б). При этом увеличение высоты модели струегасителя до 128 мм способствует уменьшению объема застойных зон до 25 % (рис. 7). Однако эффективность применения струегасителя имеет кратковременный характер, поток расплава, отражаясь от поверхности, ниспадает, образуются придонные потоки.

Обсуждение результатов

Установлено, что наилучшие результаты достигаются при использовании полнопрофильных перегородок с 2 рядами отверстий диаметром 20 мм для нижнего ряда и 32 мм для верхнего ряда. В этом случае поток моделирующей жидкости направляется к поверхности, создавая замкнутый контур циркуляции, охватывающий практически весь объем промежуточного ковша (рис. 4 б). Кроме того, при использовании перегородок время достижения потока моделирующей жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов максимально и составило 72 и 76 с соответственно (рис. 4 б, в), что подтверждается анализом данных, полученных кондуктометрическим методом (рис. 8).

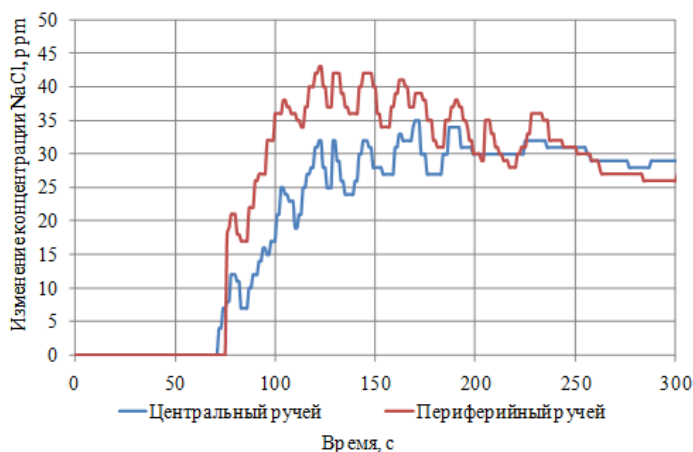


Рис. 8. Изменение концентрации NaCl по ходу процесса при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок (вариант Б).

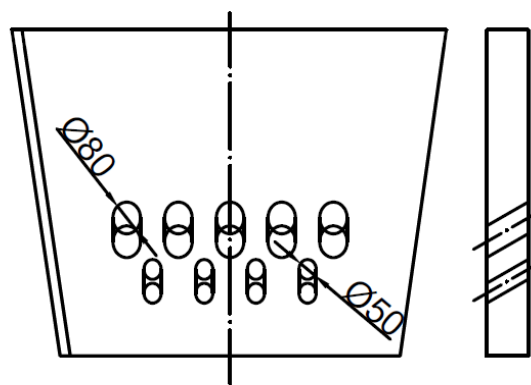


Рис. 9. Геометрические параметры полнопрофильной перегородки для промежуточного ковша МНЛЗ-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

В промышленных условиях такое распределение потоков будет способствовать удалению неметаллических включений путем их коагуляции и дальнейшей ассимиляции покровным рафинировочным шлаком. При этом объем застойных зон составляет <18 % (рис. 7).

Заключение

Таким образом, для обеспечения рафинирования металлического расплава от неметаллических включений и гомогенизации расплава по химическому составу и температуре рекомендуется оснастить промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок АО «ЕВРАЗ ЗСМК» двумя перегородками, установленными на расстоянии 360 мм от оси защитной трубы.

Работа выполнена в СибГИУ по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект МК-1191.2017.8

Библиографический список

1. Григорович, К.В. Применение фракционного газового анализа для оценки эксплуатационных свойств рельсовой стали. Повышение качества и эксплуатационной стойкости рельсовой продукции: Сб. докладов / К.В. Григорович, А.М. Арсенкин, С.С. Шибяев. – М.: Интекст, 2005. – 168 с.
2. Дерябин, А.А. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / А.А. Дерябин, А.В. Добужская // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 38–43.
3. Дерябин, А.А. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте / А.А. Дерябин, В.А. Рабовский, Е.А. Шур // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 82–85.
4. Линчевский, Б.В. Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений / Б.В. Линчевский, С.Н. Вартпатрикова, В.Я. Дашевский, В.И. Кашин, Н.Н. Макарова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 14–18.

5. Добужская, А.Б. Исследование неметаллических включений в рельсах и очагах контактно-усталостных дефектов. Неметаллические включения в рельсовой стали: Сб. науч. тр. / А.Б. Добужская, А.А. Дерябин, В.И. Сырейщикова. – Екатеринбург: ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2005. – 152 с.

6. Казаков, А.А. Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали / А.А. Казаков, П.В. Ковалев, С.В. Рябошук [и др.] // Черные металлы. 2014. – №4. – С. 43–48.

7. Числавлев, В.В., Фейлер С.В. Лабораторно - экспериментальный комплекс для изучения процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали. // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе: сборник научных трудов. – 2015. – Вып. 18. – С. 60–72.

8. Числавлев, В.В. Моделирование процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали / В.В. Числавлев, С.В. Глушков; науч. рук. С.В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 1-3 июня 2016 г. – Новокузнецк: СибГИУ, – 2016. – Вып. 20. – Ч. 3: Естественные и технические науки. – С. 175–178. – Библиогр.: – С. 178.

9. Протопопов, Е.В. Разработка математической модели гидродинамики металлического расплава в промежуточном ковше четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок / Е.В. Протопопов, В.В. Числавлев, С.В. Фейлер, Д.Т. Неунывахина // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Москва; Новокузнецк : СибГИУ, 2015. – Вып. 34. – С. 24–29.

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE TUNDISH DURING CONTINUOUS CASTING OF RAIL STEEL

V.V. Chislavlev, S.V. Feyler, D.V. Bojkov, D.T. Neunyvakhina

(SibGIU, Novokuznetsk; EVRAZ ZSMK, Novokuznetsk, Russia)

chisl.vv@yandex.ru

Physical and mathematical modeling of hydrodynamic processes in the tundish of a four-arm continuous casting machine is carried out. To conduct research based on the theory of similarity, a laboratory experimental complex has been developed, the main element of which is the physical model of the tundish of the continuous casting blooms of the JSC "EVRAZ ZSMK" made of organic glass in a scale of 1:2.5. Models of refractory elements for the organization of metal flows are made using FDM-technology 3D printing. To confirm the adequacy of the results obtained in physical modeling, mathematical modeling was carried out. As a result of the carried out experimental studies, a qualitative assessment of the processes of metal melt mixing during continuous casting, a quantitative assessment of the volume of stagnant zones using the RTD method, evaluated the efficiency of metal refining from nonmetallic inclusions in the intermediate ladle using refractory element models of various configuration options. It is established that the use of full-profile baffles with holes allows homogenization of the metal melt and significant-

ly reduces the volume of stagnant zones in the tundish. Recommendations on the design parameters of the full-profile refractory partitions of the tundish have been developed to ensure the refining of the metallic melt from nonmetallic inclusions.

Keywords: steel quality, nonmetallic inclusions, physical modeling, mathematical modeling, the tundish, continuous casting of steel, refractory elements.

References

1. Grigorovich, K.V. *Primenenie frakcionnogo gazovogo analiza dlja ocenki jekspluacionnyh svojstv rel'sovoj stali. Povyshenie kachestva i jekspluacionnoj stojkosti rel'sovoj produkcii: Sb. dokladov / K.V. Grigorovich, A.M. Arsenkin, S.S. Shibaev. – M.: Intekst, 2005. – 168 s.*
2. Derjabin, A.A. *Issledovanie jeffektivnosti processov raskislenija, modificirovanija i mikro- legirovanija rel'sovoj stali / A.A. Derjabin, A.V. Dobuzhskaja // Stal'. – 2000. – № 11. – S. 38–43.*
3. Derjabin, A.A. *Povyshenie trebovanij k kachestvu zheleznodorozhnyh rel'sov v novom nacional'- nom standarte / A.A. Derjabin, V.A. Rabovskij, E.A. Shur // Stal'. – 2000. – № 11. – S. 82–85.*
4. Linchevskij, B.V. *Vlijanie raskislenija kordovoj stali na prirodu oksidnyh nemetallicheskih vkljuchenij / B.V. Linchevskij, S.N. Vartpatrikova, V.Ja. Dashevskij, V.I. Kashin, N.N. Makarova // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2002. – № 5. – S. 14–18.*
5. Dobuzhskaja, A.B. *Issledovanie nemetallicheskih vkljuchenij v rel'sah i ochagah kontaktno-ustalostnyh defektov. Nemetallicheskie vkljuchenija v rel'sovoj stali: Sb. nauch. tr. / A.B. Dobuzhskaja, A.A. Derjabin, V.I. Syrejshhikova – Ekaterinburg: GNC RF OAO «UIM», 2005. – 152 s.*
6. Kazakov, A.A. *Upravlenie processami obrazovanija nemetallicheskih vkljuchenij pri proizvodstve konverternoj stali / A.A. Kazakov, P.V. Kovalev, S.V. Rjaboshuk [i dr.] // Chernye metally. 2014. – №4. – S. 43–48.*
7. Chislavlev, V.V., Fejler S.V. *Laboratno - jeksperimental'nyj kompleks dlja izuchenija processov gidrodinamiki pri nepreryvnoj razlivke stali. // Sovremennye voprosy teorii i praktiki obuchenija v vuze: sbornik nauchnyh trudov. – 2015. – Vyp. 18. – S. 60–72.*
8. Chislavlev, V.V. *Modelirovanie processov gidrodinamiki pri nepreryvnoj razlivke stali / V.V. Chislavlev, S.V. Glushkov; nauch. ruk. S.V. Fejler // Nauka i molodezh': problemy, poiski, reshenija: trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, 1-3 ijunya 2016 g. – Novokuzneck: SibGIU, – 2016. – Vyp. 20. – Ch. 3: Estestvennye i tehicheskie nauki. – S. 175–178. – Bibliogr.: – S. 178.*
9. Protopopov, E.V. *Razrabotka matematicheskoj modeli gidrodinamiki metallischeskogo rasplava v promezhutochnom kovshe chetyrehhruch'evoj mashiny nepreryvnogo lit'ja zagotovok / E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, S.V. Fejler, D.T. Neunyahina // Vestnik gorno-metallurgicheskoj sekcii Rossijskoj akademii*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ УЧАСТКОВ «ИЗГИБА И ПРАВКИ» И «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Е.Н. Смирнов¹, В.Н. Ручко², В.А. Скляр¹, А.Г. Соболев²

*(¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал «МИСиС»), г. Старый Оскол, Россия; ²Донецкий национальный технический университет, ДНР)
en_smirnov@i.ua, mechanic-vlad@yandex.ua*

Представлены результаты сравнительного исследования двух схем взаимного расположения тянуще-правильных клетей и клетей, которые реализуют технологию так называемого «мягкого» обжатия в линии сортовой машины непрерывного литья заготовок. На примере трех сечений отливаемой непрерывнолитой квадратной сортовой заготовки показано, что взаимное расположение тянуще-правильных клетей и клетей «мягкого» обжатия оказывает заметное влияние на формируемое напряженно-деформированное состояние, в то время как эффективность самого процесса «мягкого» обжатия зависит в основном от технологических параметров редуцирующих клетей на участке «мягкого» обжатия и практически не зависит от схемы расположения оборудования. Анализ полей эффективности напряжений, полученных с помощью математического моделирования с использованием метода конечных элементов, позволил рекомендовать рациональную схему расположения оборудования в технологической линии машины непрерывного литья заготовки, которая обеспечивает минимальный уровень напряжений, что благоприятно скажется как на состоянии поверхности непрерывнолитой заготовки так и на износе деформирующих валков.

Результаты исследования и разработанные подходы могут быть использованы при проектировании и реконструкции машин непрерывного литья заготовок в случае установки клетей «мягкого» обжатия.

Ключевые слова: «Мягкое» обжатие, непрерывнолитая заготовка, напряженно-деформированное состояние, эффективность, машина непрерывного литья заготовок, математическое моделирование.

Введение

Повышения качества исходного непрерывнолитого слитка можно добиться за счет использования приемов внешнего воздействия на кристаллизующийся металл, к которым относится и метод «мягкого» обжатия непрерывнолитой заготовки в линии МНЛЗ, позволяющий добиться уменьшения осевой ликвации и пористости [1].

Относительная новизна данного процесса обуславливает непрекращающийся поиск оптимальных схем реализации технологии. Одним из дискуссионных остается вопрос выбора схемы взаимного расположения тянуще-правильного агрегата (ТПА) и клетей (сегментов) блока «мягкого» обжатия, ко-