

УДК 669.187.25

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАФИНИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Протопопов Е.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры металлургии  
черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)*

*Числавлев В.В.<sup>1</sup>, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов*

*Темлянец М.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики  
и экологии (uchebn\_otdel@sibsiu.ru)*

*Головатенко А.В.<sup>2</sup>, к.т.н., директор по рельсовому  
производству (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»  
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

**Аннотация.** Качество и эксплуатационные свойства рельсов определяют срок их эксплуатационной службы в пути. Основными определяющими качествами стали параметрами являются химическая неоднородность и неметаллические включения в металле. Эффективность гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ в значительной степени определяется организацией гидродинамических процессов, внутренней геометрией ковша, наличием дополнительных огнеупорных элементов. С применением физического и математического моделирования проведено исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов различных конфигураций промежуточного ковша на процессы движения расплава. Физическое моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше с учетом соблюдения условий подобия проведено на специально созданном лабораторно-экспериментальном комплексе. Численные эксперименты проведены с использованием методов вычислительной гидродинамики (конечных объемов) на трехмерной турбулентной математической модели с однофазным представлением течения металлического расплава в промежуточном ковше. Для оценки эффективности гомогенизации расплава по результатам физического и математического моделирования разработана новая методика, основанная на анализе распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия. По результатам экспериментов предложена конфигурация внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ. Рассмотрена конструкция, обеспечивающая эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений. Разработана и в промышленных условиях апробирована конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше. Промышленные исследования реализованы в условиях четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок № 1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

**Ключевые слова:** рельсовая сталь, разливка, машина непрерывного литья заготовок, неметаллические включения, неоднородность, промежуточный ковш, расплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие железнодорожного транспорта и рост протяженности высокоскоростных железных дорог предъявляют все более высокие требования к качеству и эксплуатационным свойствам рельсов в условиях конкуренции среди мировых производителей рельсовой металлопродукции [1, 2].

В соответствии с современными представлениями [3 – 7] химическая неоднородность и неметаллические включения в металле являются основными параметрами, определяющими металлургическое качество стали и срок эксплуатационной службы рельсов в пути.

При существующих схемах выплавки, внепечной обработки и разливки рельсовой стали одним из важнейших технологических агрегатов на пути движения расплава является промежуточный ковш (ПК) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Организация гидродинамических процессов, эффективность гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений в промежуточном ковше в значительной степени определяются внутренней геометрией ковша, наличием дополнительных огнеупорных элементов (перегородок, порогов и т.д.), которые обуславливают характеристики движения металлического расплава и,

соответственно, распределение и удаление неметаллических включений [8 – 15].

Цель настоящей работы – с применением физического и математического моделирования провести комплексное исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов различных конфигураций (порогов, струегасителей, перегородок) промежуточного ковша на процессы движения расплава и по результатам экспериментов разработать рациональную конструкцию и конфигурацию внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ, которые обеспечат эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Физическое моделирование с учетом соблюдения условий подобия проводили на специально созданном лабораторно-экспериментальном комплексе кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (рис. 1) [16]. Лабораторно-экспериментальный комплекс содержит элементы: модель промежуточного ковша (1), стопор (2), трубу подвода моделирующей жидкости (3), резервуар для красителя (солевого раствора) (4), электромагнитный клапан (нормально закрытый) для подачи индикатора (5), кран (6), вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости (7), модели рафинирующих устройств (8 – 11), электромагнитный клапан (нормально открытый) для отвода моделирующей жидкости (12), расходомеры (13), линии отвода моделирующей жидкости (14), датчики кондуктометра (15), датчики уровня моделирующей жидкости (16).

Основным элементом установки является физическая модель промежуточного ковша, выполненная из прозрачного органического стекла в масштабе 1:2,5.

При проведении экспериментов в качестве моделирующей жидкости использовали техническую воду, а для визуализации движения потоков осуществляли ввод в струю водного раствора перманганата калия с концентрацией приблизительно 3 г/л. При проведении моделирования проводили непрерывную видеофиксацию протекающих процессов. Оценку степени гомогенизации жидкости, уточнение минимального времени пребывания моделирующей жидкости в объеме модели промежуточного ковша и определение объемов характерных зон осуществляли кондуктометрическим методом. В некоторых экспериментах в качестве индикатора использовали раствор хлорида натрия NaCl, при этом измерение электрической проводимости и содержания NaCl в растворе проводили солемером PS202, датчики которого устанавливали в разливных стаканах модели промежуточного ковша.

Численные эксперименты проведены с использованием методов вычислительной гидродинамики (конечных объемов) на трехмерной турбулентной математической модели с однофазным представлением течения металлического расплава в промежуточном ковше [17]. В качестве расчетной области в связи с наличием вертикальной плоскости симметрии принята половина внутреннего объема промежуточного ковша, занимаемая жидким расплавом. Для построения конечноэлементной модели расчетная область разделена на 350 000 конечных объемов.

Для оценки эффективности гомогенизации расплава по результатам физического и математического моделирования разработана новая методика, основанная на анализе распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия. В этом случае при определении объемов жидкого металла рассматривали зоны: застойную (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения рас-

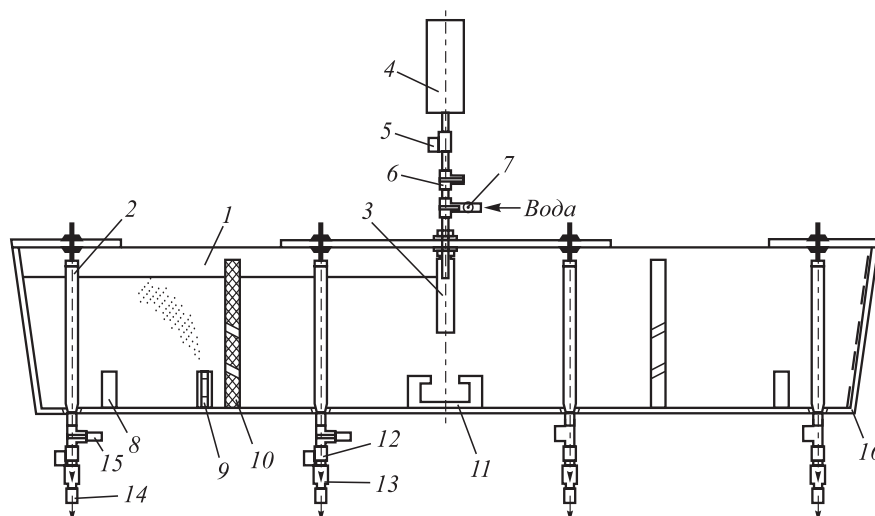


Рис. 1. Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

Fig. 1. Scheme of laboratory-experimental complex for study of hydrodynamic processes in the tundish

плава приближен к ламинарному), идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава) [18, 19].

Дальнейшие экспериментальные исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше базовой конструкции осуществляли при использовании дополнительных огнеупорных элементов (порогов, струегасителей, перегородок) различных конфигураций. Исследовали гидродинамику расплава рельсовой стали для условий разливки заготовки сечением  $300 \times 360$  мм со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как установлено, при базовом варианте конструкции промежуточного ковша время достижения металлом центральных и периферийных разливочных стаканов составляет 6 и 52 с соответственно (время соответствует реальным условиям металлургического процесса). Расплав из сталеразливочного ковша поступает в объем промежуточного ковша, достигает днища и разделяется, при этом формируются высокоскоростные потоки. Часть придонных потоков (так называемые «короткие пути») направляется к центральным разливочным стаканам на высоте 0 – 50 мм от днища

промежуточного ковша со скоростью порядка 0,13 м/с (рис. 2, б, эпюра 1). После достижения центральных разливочных стаканов скорости придонных потоков снижаются (рис. 2, б, эпюра 2). В зоне периферийных стопоров и торцевых стенок наблюдается наличие застойных зон, которые способствуют формированию температурной и химической неоднородности расплава стали. В то же время в рабочем пространстве промежуточного ковша (рис. 2, б) у торцевой стенки (область I), между периферийным и центральным стопорами (область II) наблюдаются характерные вихревые области интенсивного движения жидкости. В результате анализа длин линий тока, полученных при математическом моделировании (рис. 2, а), установлено, что более 60 % линий имеют длину 0 – 4,4 м и лишь 8 % линий имеют длину более 8,8 м, что подтверждает наличие большого количества так называемых «коротких путей» движения расплава. При этом минимальная длина линии тока составила 0,81 м, а максимальная – 40,35 м.

В соответствии с выполненными расчетами объем застойных зон в промежуточном ковше (базовый вариант конструкции) составляет примерно 28 %, при этом объемы зон идеального вытеснения и идеального смешения составляют примерно 5,5 и 66,5 % соответственно. Зафиксированная разница значений температуры на выходе из разливочных стаканов составляет 5,5 °С.

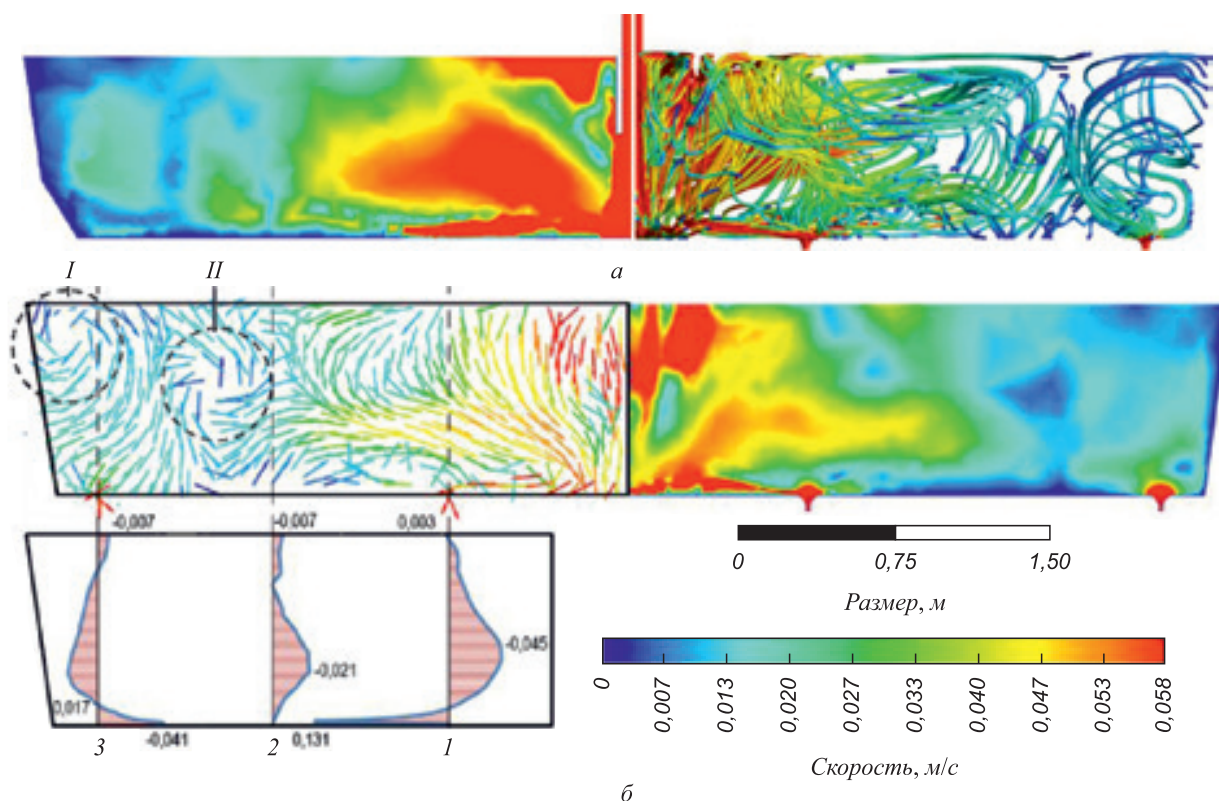


Рис. 2. Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости  $XOY$ :  
 а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Fig. 2. Outline map of the resulting melt velocity parallel to the  $XOY$  plane:  
 а – longitudinal section along the protective pipe; б – longitudinal section along the stoppers

Наличие «коротких путей» к центральным разливочным стаканам снижает эффективность гомогенизации расплава стали по химическому составу и температуре, а также рафинирования от докристаллизационных неметаллических включений, транспортируемых потоком металла в кристаллизатор.

В результате исследования гидродинамики в промежуточном ковше при использовании порогов и струегасителей различных конфигураций установлено, что увеличение высоты огнеупорных порогов до 228 и 570 мм способствует увеличению времени достижения порции моделирующей жидкости к разливочным стаканам в 8 и 1,9 раза соответственно по сравнению с базовым вариантом и уменьшению объема застойных зон до 23 %. При этом применение порогов со скошенной верхней частью позволило увеличить время достижения порции моделирующей жидкости разливочных стаканов в среднем на 3 с.

Использование струегасителя позволяет увеличить скорость конвективных потоков и увеличить время достижения порции моделирующей жидкости центрального и периферийного разливочных стаканов по сравнению с базовым вариантом в 6,3 и 2,4 раза соответственно. При этом увеличение высоты модели струегасителя до 128 и 320 мм способствует уменьшению наличия и объема застойных зон до 25 %.

При установке полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями происходит разделение внутреннего объема промежуточного ковша на отдельные камеры: приемную и разливочные. В приемной камере происходит активная циркуляция моделирующей жидкости, что способствует гомогенизации и, в дальнейшем, через переливные отверстия потоки поступают в разливочные камеры. Как установлено, конфигурация перегородок с двумя рядами отверстий диаметром 20 (50) мм для нижнего ряда (4 отверстия) и 32 (80) мм для верхнего ряда (5 отверстий) является наиболее рациональной. Суммарная площадь отверстий 5278 и 32 987 мм<sup>2</sup> и их расположение обеспечивают снижение времени достижения потоком центральных и периферийных разливочных стаканов в 19 и 2,3 раза соответственно (отличие 6 с), что свидетельствует об активной циркуляции моделирующей жидкости и ее гомогенизации. В этом случае минимальный объем застойных зон составляет примерно 18 %, а разница значений температуры на выходе из разливочных стаканов – 0,5 °С.

В промышленных условиях при установке перегородок в приемной камере металл циркулирует в замкнутой области, активно перемешивается, что способствует укрупнению и всплыванию неметаллических включений. Попадая через переливные отверстия в разливочные камеры, поток металла направляется к поверхности раздела металл – ассимилирующий шлак и движется вдоль нее, что способствует дополнительному рафинированию расплава.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием результатов моделирования для практического применения разработана конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию движения потоков расплава и его рафинирование и гомогенизацию. Промышленные исследования реализованы в условиях четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок № 1 (сечение заготовки 300×360 мм) электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [20].

Для исследования загрязненности металла неметаллическими включениями в промышленных условиях вырезали образцы из различных зон (центральной, зоны столбчатых кристаллов) непрерывнолитых заготовок, разлитых на МНЛЗ при базовом и предлагаемом вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша. Исследования проводили на нетравленных шлифах с использованием металлографического микроскопа ЛабоМет-И1 (при увеличении в 100 крат) в соответствии с ГОСТ 1778 – 70.

Установлено, что степень ликвации на заготовках, полученных с использованием в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции, снизилась по углероду в 1,2 – 2,5 раз, марганцу в 1,7 – 2,7 раза, кремнию в 1,7 – 2,1 раза, фосфору в 1,5 – 2,1 раза, сере в 1,4 – 2,8 раза относительно значений, полученных на заготовках с МНЛЗ при базовом варианте конструкции внутреннего объема промежуточного ковша.

При использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции наблюдается снижение загрязненности металла в различных зонах непрерывнолитых заготовок, полученных с центральных и периферийных ручьев, неметаллическими включениями (оксиды точечные, силикаты недеформирующиеся, сульфиды). При этом балл загрязненности оксидами точечными снизился с 3а до 1а.

В целом эффективность различных конфигураций внутреннего объема промежуточного ковша оценивали по количеству отбракованных рельсов на ЛНК-100 м на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 по проведенным опытно-промышленным исследованиям без использования огнеупорных элементов в промежуточном ковше (сравнительная серия), с использованием струегасителя (рис. 3, а), с использованием полнопрофильных перегородок (рис. 3, б).

Из анализа результатов опытно-промышленных исследований (рис. 4) следует, что в сравнительной серии экспериментов количество отбракованных рельсов по дефектам неметаллические включения достигает 90 шт (или 7 %), при этом количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях, составляет 62 шт (или 4,8 %)

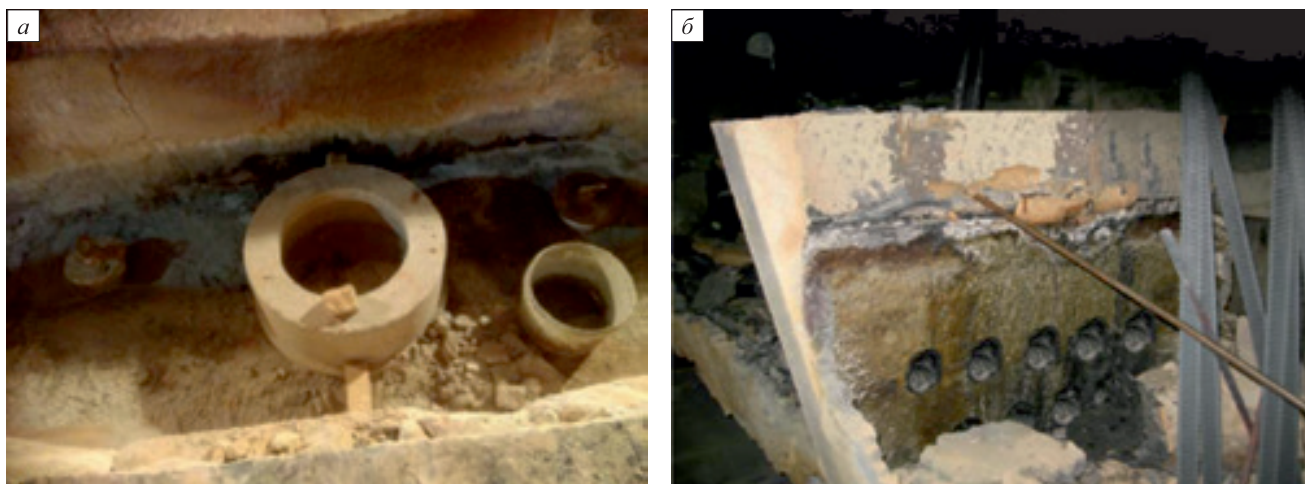


Рис. 3. Промежуточный ковш МНЛЗ ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оборудованный огнеупорными элементами: а – струегаситель; б – перегородка (после эксперимента, серия 20 плавов)

Fig. 3. Tundish of CCM of EAF shop at JSC “EVRAZ ZSMK” CCM equipped with refractory elements: а – flame dumper; б – partition plate (after the experiment, a series of 20 heats)

и 28 шт (или 2,2 %) соответственно. Количество отбракованных рельсов из заготовок, разлитых на центральных ручьях, в 2,2 раза больше, чем изготовленных из заготовок, разлитых на периферийных ручьях. Такое неравномерное распределение брака рельсов по неметаллическим включениям по центральным и периферийным ручьям свидетельствует о наличии «коротких путей», по которым неметаллические включения с потоком расплава попадают в центральные разливочные стаканы. Это подтверждается результатами моделирования.

В опытной кампании под контролем при использовании струегасителя общее количество отбракованных рельсов снижается до 67 шт (или 5,2 %) или на 25,6 % при сопоставлении со сравнительной серией, также снижается соотношение по центральным (41 шт) и периферийным (26 шт) ручьям до 1,58 %. Это свидетельствует о более благоприятных условиях для ассими-

ляции неметаллических включений рафинировочным шлаком, при которых основной поток расплава взаимодействует с рафинировочным шлаком в центральном объеме промежуточного ковша. При установке полнопрофильных перегородок количество отбракованных рельсов в серии составило 28 шт (2,19 %). Количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях, составило 13 и 15 шт соответственно, а их соотношение примерно 0,87. Это позволяет сделать вывод о более рациональных гидродинамических условиях в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок разработанной конструкции. При данных условиях отсутствуют так называемые «короткие пути»: неметаллические включения, двигаясь в потоке расплава вблизи поверхности рафинировочного шлака, в значительной степени им ассимилируются.

На основе анализа результатов промышленных экспериментов, физического и математического моделирования для осуществления прогнозных расчетов количества (Б, %) отбракованных по неметаллическим включениям рельсов получено соотношение:

$$B = -19,479V_{ив} + 5,604V_{ис} + 15,632V_з,$$

где  $V_{ив} + V_{ис} + V_з = 1$ ;  $V_{ив}$ ,  $V_{ис}$  и  $V_з$  – объемные доли зон идеального вытеснения, идеального смешения и застойных зон.

### Выводы

Разработана и апробирована в промышленных условиях конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное

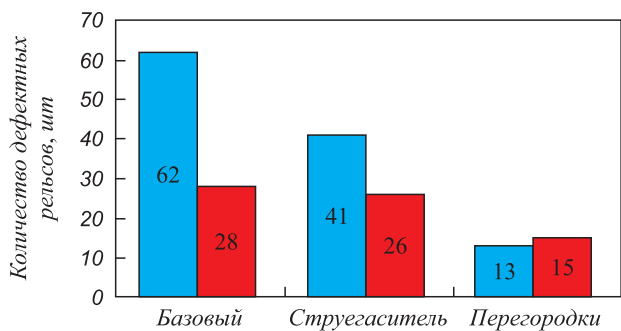


Рис. 4. Количество дефектных рельсов по центральным (■) и периферийным (■) ручьям при различных вариантах внутренней конфигурации промежуточного ковша

Fig. 4. Number of defective rails along the central (■) and peripheral (■) streams with various options for internal configuration of the tundish

рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хлыст С.В., Кузьмиченко В.М., Резанов В.А., Борц А.И., Шур Е.В. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 14 – 19.
2. Борц А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции // Железнодорожный транспорт. 2015. № 8. С. 54 – 57.
3. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянцева, Л.В. Корнева, Т.Н. Осколкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
4. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37B. No. 5. P. 733 – 761.
5. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 6. P. 542 – 553.
6. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 1997. Vol. 6. No. 1. P. 27 – 34.
7. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. – In: Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness / Ed. J.K. Mahaney Jr. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. P. 73 – 88.
8. Вдовин К.Н., Семенов М.В., Точилкин В.В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2006. – 118 с.
9. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П., Ефимова В.Г. Современные промежуточные ковши для высокопроизводительных МНЛЗ // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2012. № 9. С. 19 – 27.
10. Кислица В.В., Чичкарев Е.А., Исаев О.Б. Совершенствование и внедрение комплексной технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2009. № 2. С. 17 – 21.
11. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness // ISIJ International. 2003. Vol. 43. No. 3. P. 271 – 291.
12. Okorokov G.N., Donets A.I., Shevtsov A.Z., Sinel'nikov V.A., Yugov P.I., Zin'ko B.F., Krutyanskiy M.M., Popov A.M. A heating tundish – the final link in a continuous steelmaking technology // Metallurgist. 1998. Vol. 42. No. 1. P. 15 – 20.
13. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska // Iron and Steel Engineer. 1995. Vol. 73. No. 11. P. 39 – 44.
14. Setsuo K., Shuji W., Toyohiko K., Takafumi H. Nippon steel type tundish plasma heater “NS-Plasma I” for continuous caster // Shinnittetsu Giho. 2001. No. 375. P. 145 – 149.
15. Исакаев М.-Э.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. Плазменный подогрев стали и конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ для его реализации // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. № 1 (4). С. 3 – 8.
16. Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Фейлер С.В. Исследование процессов течения металлического расплава в промежуточном ковше МНЛЗ методами вычислительной гидродинамики // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 19 – 23.
17. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Physical modeling of the processes of metal melt movement during continuous casting // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. No. 1. Article 012001.
18. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. – 3<sup>rd</sup> ed. – New York, 1999. – 668 p.
19. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes // Ironmaking and Steelmaking. 1986. Vol. 13. No. 5. P. 241 – 247.
20. Числавлев В.В., Фейлер С.В., Бойков Д.В., Неунывахина Д.Т. Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали в промежуточном ковше МНЛЗ // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 73 – 74.

Поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.

После доработки 11 марта 2019 г.

Принята к публикации 4 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 298–304.

## INCREASING EFFICIENCY OF RAIL STEEL REFINING IN CCM TUNDISH BASED ON RATIONAL ORGANIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES

*E.V. Protopopov<sup>1</sup>, V.V. Chislavlev<sup>1</sup>, M.V. Temlyantsev<sup>1</sup>, A.V. Golovatenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

<sup>2</sup> JSC “EVRAZ - Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** Quality and operational properties of rails determine duration of their operational service. The main parameters that determine quality of steel are chemical heterogeneity and presence of non-metallic inclusions in metal. Efficiency of homogenization of metal melt and its refining from non-metallic inclusions in tundish is largely determined by organization of hydrodynamic processes, internal geometry of ladle, and presence of additional refractory elements. Using physical and mathematical modeling, study of the influence of additional refractory elements of various configurations of intermediate ladle on processes of melt flow was carried out. Physical modeling of hydrodynamic processes in the tundish taking into account requirements of similarity theory was made on specially created labo-

ratory-experimental complex. Numerical experiments were carried out using computational fluid dynamics methods (finite volumes) on three-dimensional turbulent mathematical model with a single-phase representation of metal melt flow in tundish. To evaluate efficiency of melt homogenization according to results of physical and mathematical modeling, new technique has been developed based on analysis of distribution of time of liquid placement in continuous flow reactor. According to the results of experiments, configuration of the internal volume of tundish of four-strand CCM is proposed. A construction is considered that provides effective homogenization of molten rail steel and its refining from non-metallic inclusions. The design of full-profile compartments was developed and tested under industrial conditions, which ensure rational organization of melt flows, its homogenization and efficient refining of rail steel from non-metallic inclusions in the tundish. Industrial research was carried out under the conditions of four-strand CCM No. 1 of EAF shop at JSC “EVRAZ ZSMK”.

**Keywords:** rail steel, casting, CCM, non-metallic inclusions, heterogeneity, tundish, melt.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304

## REFERENCES

1. Khlyst S.V., Kuz'michenko V.M., Rezanov V.A., Borts A.I., Shur E.V. Promising technology of rail production for high speed and heavy traffic. *Vestnik VNIIZhT*. 2013, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.).
2. Borts A.I. Innovative rail products. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2015, no. 8, pp. 54–57. (In Russ.).
3. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Oskolkova T.N., Gavrilov V.V. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali* [Defects and quality of rail steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 218 p. (In Russ.).
4. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37B, no. 5, pp. 733–761.
5. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 6, pp. 542–553.
6. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1997, vol. 6, no. 1, pp. 27–34.
7. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. In: *Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness*. Mahaney J.K. (Jr.) ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999, pp. 73–88.
8. Vdovin K.N., Semenov M.V., Tochilkin V.V. *Rafinirovanie stali v promezhutochnom kovshe MNLZ: Monografiya* [Steel refining in CCM tundish: Monograph]. Magnitogorsk: MGTU, 2006, 118 p. (In Russ.).
9. Smirnov A.N., Kravchenko A.V., Verzilov A.P., Efimova V.G. Modern tundish for high-performance CCM. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 9, pp. 19–27. (In Russ.).
10. Kislitsa V.V., Chichkarev E.A., Isaev O.B. Improvement and implementation of a comprehensive steel refining technology in CCM tundish. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2009, no. 2, pp. 17–21. (In Russ.).
11. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 3, pp. 271–291.
12. Okorokov G.N., Donets A.I., Shevtsov A.Z., Sinel'nikov V.A., Yugov P.I., Zin'ko B.F., Krutyanskii M.M., Popov A.M. A heating tundish – the final link in a continuous steelmaking technology. *Metallurgist*. 1998, vol. 42, no. 1, pp. 15–20.
13. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska. *Iron and Steel Engineer*. 1995, vol. 73, no. 11, pp. 39–44.
14. Setsuo K., Shuji W., Toyohiko K., Takafumi H. Nippon steel type tundish plasma heater "NS-Plasma I" for continuous caster. *Shin-nittetsu Giho*. 2001, no. 375, pp. 145–149.
15. Isakaev M.-E.Kh., Tyuftayev A.S., Yusupov D.I. Plasma heating of steel and design of CCM tundish for its implementation. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov*. 2015, no. 1 (4), pp. 3–8. (In Russ.).
16. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Study of metal melt flow in CCM tundish using computational fluid dynamics. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2015, no. 4, pp. 19–23. (In Russ.).
17. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Physical modeling of the processes of metal melt movement during continuous casting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012001.
18. Levenspiel O. *Chemical Reaction Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, 1999, 668 p.
19. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes. *Ironmaking and Steelmaking*. 1986, vol. 13, no. 5, pp. 241–247.
20. Chislavlev V.V., Feiler S.V., Boikov D.V., Neunyvakhina D.T. Development of refractory elements design for steel refining in CCM tundish. *Novye ognepopy*. 2017, no. 3, pp. 73–74. (In Russ.).

## Information about the authors:

**E.V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)

**V.V. Chislavlev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Ferrous Metallurgy

**M.V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of "Thermal Power and Ecology" (uchebn\_otdel@sibsiu.ru)

**A.V. Golovatenko**, Cand. Sci. (Eng.), Director of Rail Production (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

Received February 25, 2019

Revised March 11, 2019

Accepted April 4, 2019