

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ • РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ • СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 2020

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 63

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «**Экономическая эффективность металлургического производства**» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «**Металлургические технологии**» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

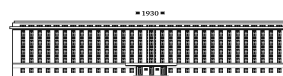
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЕШАЛКИН В.П. (Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)
МУЛЮКОВ Р.Р. (ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС (Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «**Ресурсосбережение в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «**Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах**» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

СОДЕРЖАНИЕ

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее!	291
--	-----

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянец М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов	298
Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование	305
Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Беляев С.В., Добрянский А.В. Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане	313
Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами	318
Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок	327
Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидно-железосодержащих отходов металлургического производства ...	335

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения	344
--	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава VK10KS на его структуру и свойства	351
Зоря И.В., Полегаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Кокханенко Д.В. Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование	357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа	364
---	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золин И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов	373
--	-----

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

ГлушакOVA О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашиников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малоэнергетических металлургических технологиях	389
--	-----

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90 th Anniversary of Siberian State Industrial University	291
---	-----

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes	298
N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing	305
A.R. Fastyskovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill	313
A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties	318
O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate	327
A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production	335

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment	344
--	-----

MATERIAL SCIENCE

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties	351
I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation	357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type	364
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use	373
--	-----

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsybmal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies	389
--	-----

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

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

Числавлев В.В.¹, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов

Темлянец М.В.¹, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики
и экологии (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

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

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

² 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 качества 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, выпечной 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, стругасителей, 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 разливочных 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-

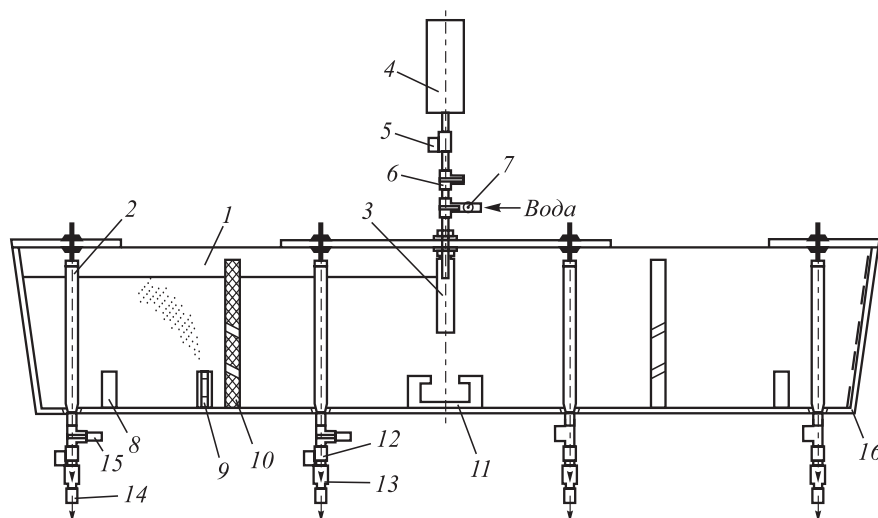


Рис. 1. Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

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 300×360 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.

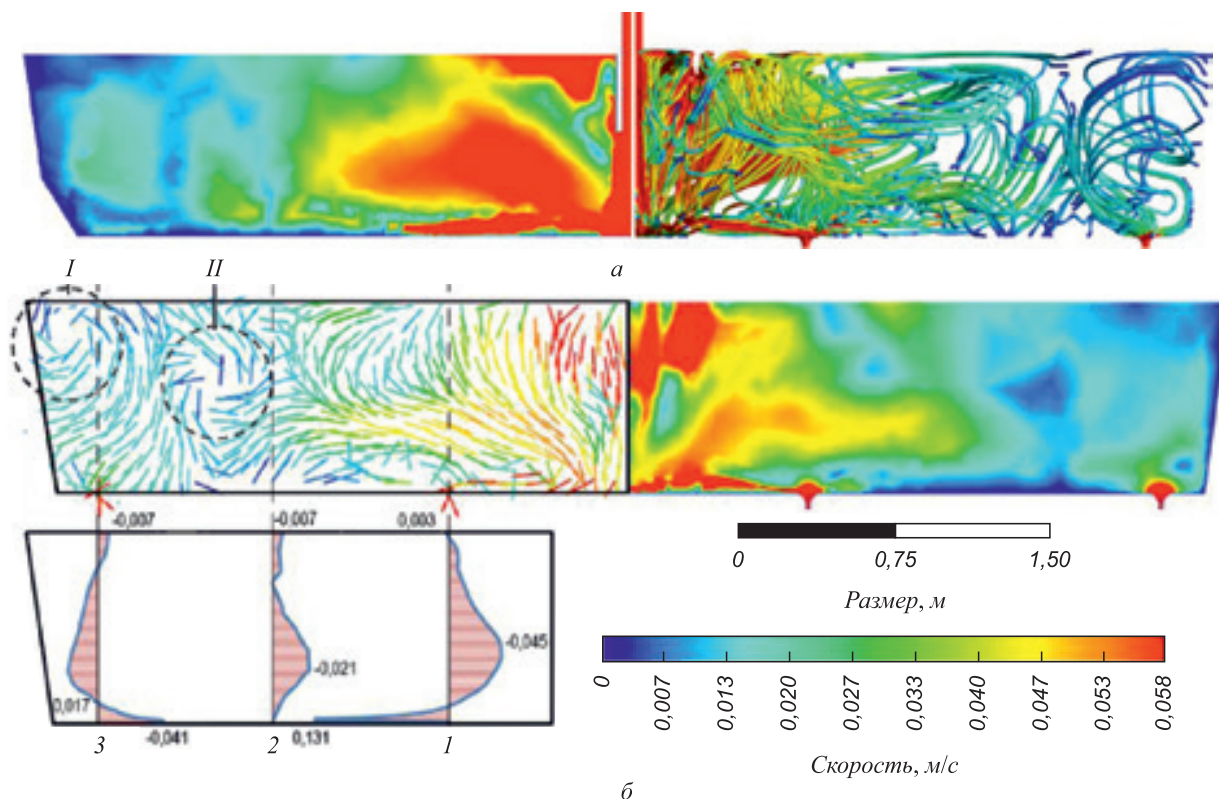


Рис. 2. Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY :
а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

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 мм² 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 %)

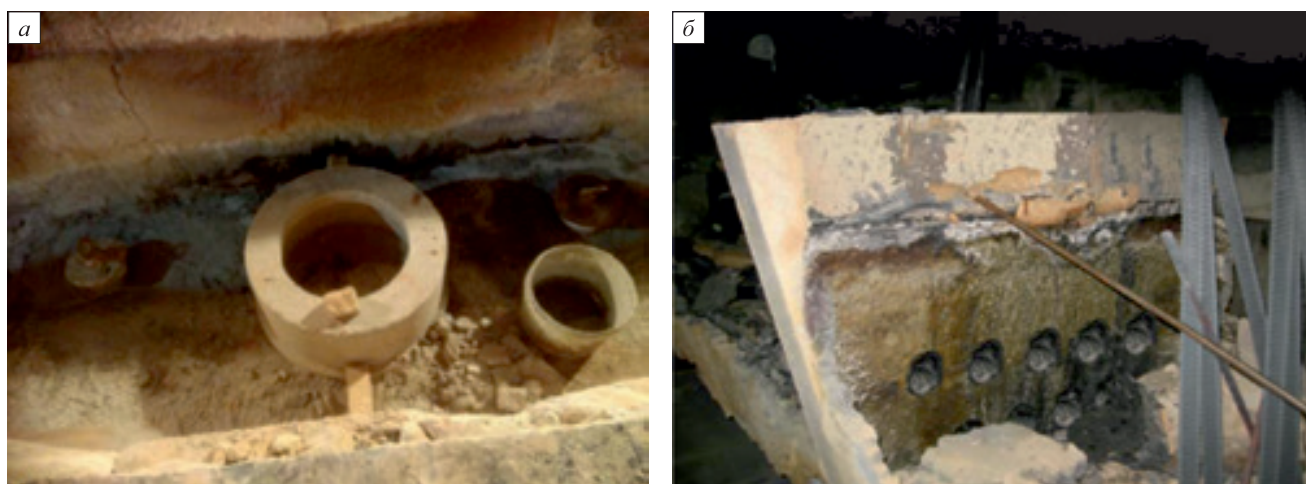


Рис. 3. Промежуточный ковш МНЛЗ ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оборудованный огнеупорными элементами:
а – струегаситель; б – перегородка (после эксперимента, серия 20 плавов)

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:

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

где $V_{ив} + V_{ис} + V_z = 1$; $V_{ив}$, $V_{ис}$ и V_z – 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

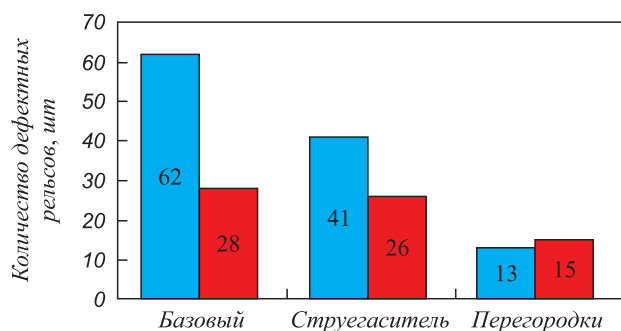


Рис. 4. Количество дефектных рельсов по центральным (■) и периферийным (■) ручьям при различных вариантах внутренней конфигурации промежуточного ковша

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. Осолкова, 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., Krutyanskii 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. Исаев 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. – 3rd 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. Protopopov¹, V.V. Chislavlev¹, M.V. Temlyantsev¹, A.V. Golovatenko²

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² 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 laboratory-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. *Zhelezнодороzhnyi 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. Kislytsa 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*. 3rd 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