

М. Ю. Турчин¹, С. В. Сухарев² (✉), к. т. н. А. В. Заболотский³,
А. В. Шестаков³, А. А. Бердышев³, А. В. Скрипник²

¹ ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

² ООО «Группа «Магнезит», Москва, Россия

³ ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

УДК 621.746.329.047.001.57

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ

Рассмотрены особенности условий работы промежуточных ковшей слабовых МНЛЗ на примере 27-т агрегатов ККЦ ПАО «Северсталь». Приведены результаты математического моделирования гидродинамики в промежуточном ковше с разными гасителями турбулентности входящей струи. Разработан, защищен патентом и внедрен металлоприемник (бренд РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®) с волнообразной внутренней поверхностью, предназначенный для повышения качества непрерывнолитой заготовки, а также обеспечивающий увеличение стабильности и технологичности процесса непрерывной разливки за счет специальной конструкции.

Ключевые слова: непрерывная разливка, МНЛЗ, промежуточный ковш, металлоприемник, неметаллические включения (НВ), моделирование движения потоков.

Современные требования к эксплуатации стальной продукции обуславливают достаточно жесткие требования как к металлургическим технологиям ее производства в целом, так и к огнеупорным материалам [1]. В технологическом процессе сталеплавильного передела стадия непрерывной разливки — последняя возможность коррекции стального расплава для влияния на будущие характеристики готовой продукции, в том числе за счет введения непосредственно в промежуточный ковш некоторых раскислителей, модификаторов и легирующих [2]. Известен также опыт управления температурным режимом разливки с помощью плазменного нагрева в промежуточном ковше [3].

В современных условиях промежуточный ковш становится настоящим «металлургическим реактором» [4] наравне с остальными агрегатами технологического процесса выплавки — внепечная обработка — разливка. В промежуточных ковшах МНЛЗ решают в основном задачи стабилизации характеристик разливаемой стали по температуре и химическому составу, а также завершающей стадии рафинирования металла от неметаллических включений (НВ). Комплекс огнеупоров, применяемых в промежуточном ковше для непрерывной разливки стали, призван обеспечить заданную серийность рабо-

ты МНЛЗ при минимальном загрязнении металла экзогенными НВ, одним из источников которых является разрушение самих огнеупоров. Практика показывает, что в наиболее напряженных условиях в промежуточном ковше работает футеровка приемной зоны, включая так называемую «бойную» зону (зона падения струи металла), стойкость которой зачастую является определяющим фактором серийности разливки.

За последнее десятилетие были предложены разнообразные конструкции промежуточного ковша и модификаций устройств, регулирующих потоки жидкой стали — от продувочных пробок и порожков с продувкой до полноразмерных металлоприемных колодцев и перегородок не условно, а физически разделяющих внутреннее пространство промежуточного ковша на приемную и разливочные зоны. Цель большинства инноваций в этой области — повышение производительности и снижение затрат на производство за счет предельного увеличения серийности разливки. Такой подход предназначался в первую очередь для промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ, в которых серийность методом «плавка на плавку» неоднократно достигала трехзначных величин, как, например, на мини-заводе «НЛМК-Калуга» [5].

В отношении разливки стали на слабовых МНЛЗ применение инновационных огнеупорных конструкций для регулирования потоков в промежуточных ковшах было менее интенсивным, что обусловлено особенностями процесса и, как следствие, существенно меньшей (по сравнению с сортовыми МНЛЗ) серийностью. Серийность разливки слабовых МНЛЗ на сегодняшний день составляет, как правило, 6–15 плавов для про-



С. В. Сухарев

E-mail: ssuharev@magnezit.com

межуточных ковшей со стопорным дозированием металла и 8–25 плавов для промежуточных ковшей с шиберными затворами. При такой серийности слябовых МНЛЗ отсутствует технологическая потребность в полноразмерных металлоприемных колодцах, которые защищают футеровку стен приемной зоны промежуточного ковша по всей высоте (от дна до его обортки). Применение полноразмерных металлоприемных колодцев для слябовых МНЛЗ обычно экономически нецелесообразно вследствие повышения удельных затрат на производство 1 т литой стали.

В связи с большим сечением отливаемых заготовок огнеупоры при службе в промежуточных ковшах слябовых МНЛЗ испытывают разную удельную нагрузку: большая нагрузка приходится на функциональные элементы (стопоры-моноблоки, стаканы-дозаторы, погружаемые стаканы), меньшая — на огнеупоры, находящиеся под воздействием металла и шлака. С учетом особенностей разлива стали на слябовых МНЛЗ остаются актуальными задачи повышения стойкости приемной зоны промежуточного ковша и управление движением потоков стали в промежуточном ковше. Для решения этих задач представляется наиболее перспективным использование металлоприемного устройства с учетом конструктивных и технологических особенностей разлива на конкретном предприятии. Металлоприемное устройство должно:

- эффективно гасить в своем объеме турбулентность струи жидкой стали, истекающей из сталеразливочного ковша через защитную трубу;
- устранять образование дополнительной турбулентности в верхних слоях металла в промежуточном ковше из-за отклонения струи металла от ударной поверхности и далее движения этой струи вверх вдоль стенок изделия, создавая турбулентный поток. Это способствует затягиванию шлака промежуточного ковша в объем металла и ухудшению качества непрерывнолитой заготовки;
- обеспечивать стойкость футеровки «бойной» зоны, поскольку именно эта зона зачастую определяет серийность разлива на слябовой МНЛЗ при значительном запасе ресурса (стойкости) остальной футеровки промежуточного ковша.

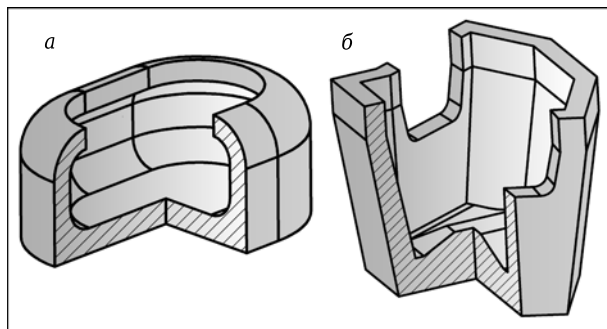


Рис. 1. Примеры металлоприемных устройств, поставляемых Группой «Магнезит»: а — металлоприемник; б — металлоприемный колодец

Группа «Магнезит» имеет многолетний опыт производства и поставок металлоприемных устройств различных конфигурации и химического состава (рис. 1). На Саткинской производственной площадке Группы «Магнезит» есть возможность производить металлоприемные устройства в широком диапазоне форм, составов (высокоглиноземистые, периклазовые, шпинельные) и модифицирующих добавок. Материалы и особенности технологии производства изделий каждой партии подбирают, исходя из задач, поставленных потребителем, и условий эксплуатации на конкретных предприятиях. Поставляемые Группой «Магнезит» металлоприемные устройства могут быть предназначены как для встраивания в футеровку промежуточного ковша, так и для установки их отдельно. В 2012–2014 гг. были получены патенты: на полезную модель 114627 «Промежуточный ковш для непрерывной разливки металла»; на полезную модель 130244 «Металлоприемный колодец»; на полезную модель 130527 «Промежуточный ковш для непрерывной разливки металла»; на изобретение 2507028 «Металлоприемник». С 2013 г. инновационная продукция в области металлоприемных устройств объединена под брендом РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM® и защищена товарным знаком № 513914.

В 2011–2012 гг. металлургический комбинат «Северсталь» проводил оптимизацию процесса разлива стали в ККЦ. С этой целью ряд приглашенных предприятий (ЗАО «Корад», ФГУП «ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина», Нижегородский государственный технический университет) участвовали в совместном с комбинатом моделировании дизайна 27-т промежуточного ковша для слябовых МНЛЗ. В статье [6] приведен анализ ситуации, смоделированы различные варианты компоновки наполнения внутреннего пространства промежуточного ковша приспособлениями для организации потоков, а также предложена концепция металлоприемника со стенками разной высоты, компенсирующая несимметричное расположение изделия в промежуточном ковше. В связи с этим Группа «Магнезит» предложила комбинату «Северсталь» новую конструкцию металлоприемного устройства с учетом особенностей разлива стали в ККЦ. Эта особенность заключается в несимметричном (относительно каждого из двух ручьев МНЛЗ) подводе металла из сталеразливочного ковша через защитную трубу в объем промежуточного ковша (рис. 2).

Для изучения движения потоков жидкой стали в промежуточном ковше с «бойной» плитой Группой «Магнезит» было проведено численное моделирование с помощью программного комплекса ANSYS® 15.0, результаты которого показаны на рис. 3. Для расчетов использовали тетраэдрическую адаптивную сетку, учитывающую углы и ребра реальных объектов, а также наличие пристеночных эффектов при движении

стального расплава в промежуточном ковше (путем сгущения сетки). На рис. 3 указаны основные линии тока, характеризующие движение потоков жидкой стали в объеме промежуточного ковша. Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- основной поток жидкой стали в промежуточном ковше идет вдоль дна, достигая при этом стаканов-дозаторов за разное время и, как следствие, с разной температурой (см. рис. 3, а, б);
- в приемной зоне наблюдается высокая скорость движения металла вдоль дна и стенок промежуточного ковша, что приводит к сокращению серийности разливки и повышению содержания НВ в металле за счет увеличения интенсивности износа рабочего слоя футеровки (см. рис. 3, б);
- в промежуточном ковше наблюдаются кольцевые «мертвые зоны» с замедленным массообменом (см. рис. 3, а, б).

Результаты проведенного моделирования показали, что несимметричность потоков может приводить к нарушению стабильной работы МНЛЗ, а турбулентность в приемной зоне промежуточного ковша (зоне падения струи металла) — к загрязнению стали в промежуточном ковше НВ из-за интенсивного разрушения футеровки и затягивания шлака в объем металла. Таким образом, отсутствие приспособлений для организации потоков металла в приемной зоне промежуточного ковша приводит к нарушению симметрии движения этих потоков и существенно ухудшает возможность рафинирования стали.

Следует отметить также, что компоновка двухручьевых промежуточных ковшей слабовых МНЛЗ при меньших удельных затратах основных огнеупорных материалов промежуточного ковша на 1 т разлитой стали, чем в одноручьевых (с продольным движением металла в промежуточном ковше), обеспечивает более напряженную работу как огнеупоров, так и процесса удаления НВ. Это обусловлено тем, что в двухручьевых промежуточных ковшах изначально расстояния от точки поступления металла в промежуточный ковш до стаканов-дозаторов намного короче, чем в одноручьевых. В этой ситуации крайне актуально увеличение продолжительности пребывания каждой порции металла в промежуточном ковше (разумеется, без образования застойных зон) за счет организации движения потоков с помощью металлоприемного устройства.

Цель Группы «Магнезит» — создание металлоприемника, обеспечивающего повышение качества непрерывной заготовки, а также стабильности и технологичности процесса непрерывной разливки за счет специальной конструкции. Эта конструкция должна устранять затягивание шлака промежуточного ковша в объем металла, обеспечивать стабильное распределение потоков металла в промежуточном ковше в процессе разливки и повышать серийность разливки методом

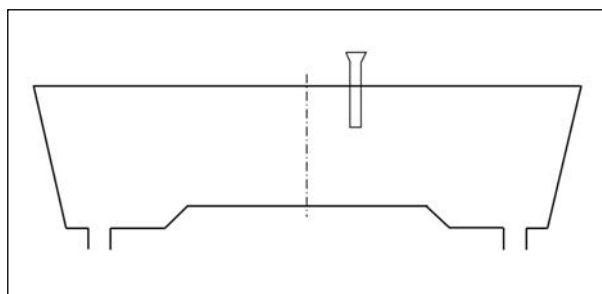


Рис. 2. Схема дизайна 27-т промежуточного ковша двухручьевой слабовой МНЛЗ ККЦ ПАО «Северсталь»

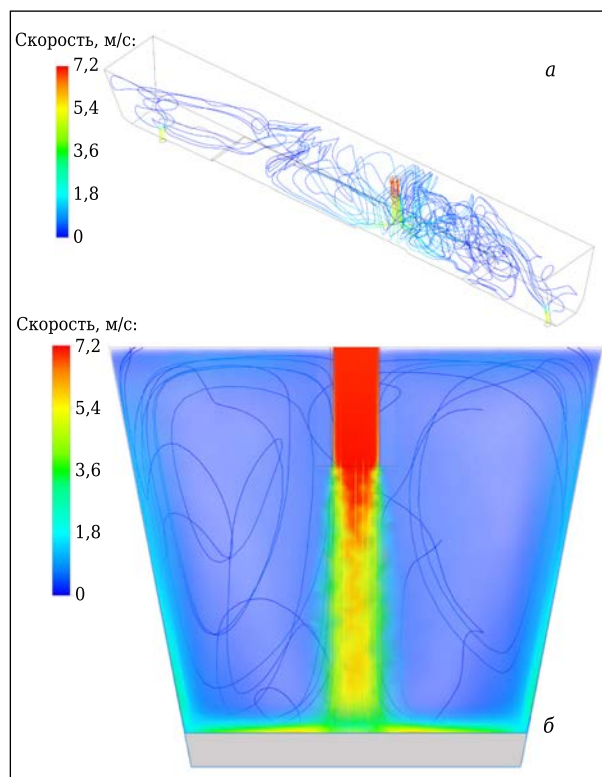


Рис. 3. Моделирование распределения потоков жидкой стали в 27-т промежуточном ковше ККЦ ПАО «Северсталь» с «бойной» плитой в приемной зоне: а — промежуточный ковш в изометрии; б — при поперечном разрезе в приемной зоне

«плавка на плавку». В результате был предложен металлоприемник, конструкция которого показана на рис. 4 (патент на изобретение 2507028).

Особенностью конструкции предложенного металлоприемника является его волнообразная внутренняя поверхность. В изделии созданы условия для локализации и снижения степени турбулентности потоков металла внутри изделия за счет частичного взаимного гашения энергии потоков путем создания локальных вихрей металла внутри изделия при отклонении части струи обратно в поток поступающего металла. Кроме того, за счет конструкции внутреннего профиля металлоприемника достигается его повышенная эрозионная стойкость, что снижает скорость поступления экзогенных НВ в металл вследствие

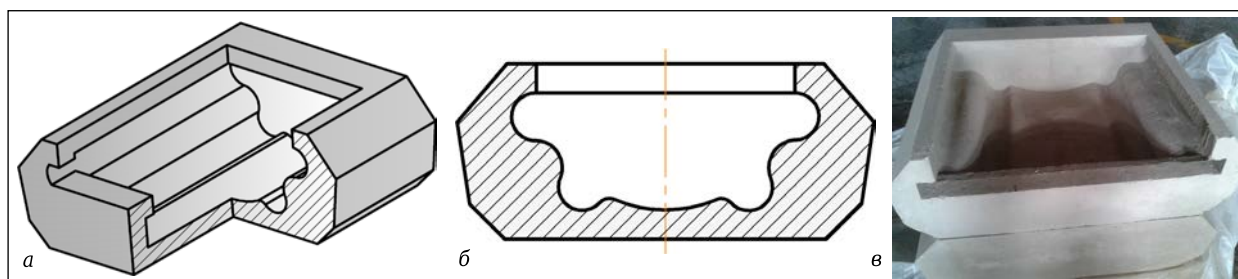


Рис. 4. Металлоприемник с волнообразной внутренней поверхностью (бренд РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®): а — схема; б — поперечный разрез; в — внешний вид

разрушения металлоприемника в процессе непрерывной разливки. Для компенсации последствий несимметричного введения металла в промежуточный ковш одна боковая стенка изделия имеет меньшую высоту, чем остальные.

Для сравнения движения потоков металла в металлоприемниках разной конструкции (рис. 5) и в 27-т промежуточном ковше (рис. 6) было проведено численное моделирование в программе ANSYS® 15.0. Сравнительный анализ результатов моделирования (см. рис. 5) показывает, что снижение турбулентности падающей струи наиболее

эффективно происходит в объеме металлоприемника с волнообразной внутренней поверхностью: из его полости расплав выходит без явно выраженных струй, полностью успокоенный (см. рис. 5, б) в отличие от изделия с прямыми стенками. На рис. 5, а видны струи металла, выходящие из под «крышки» изделия в объем приемной зоны промежуточного ковша (бирюзовый цвет), что, как видно, может приводить к образованию кольцевых застойных (закольцованных) областей в верхней части приемной зоны. Сравнительный анализ результатов моделирования (см. рис. 6) показывает:

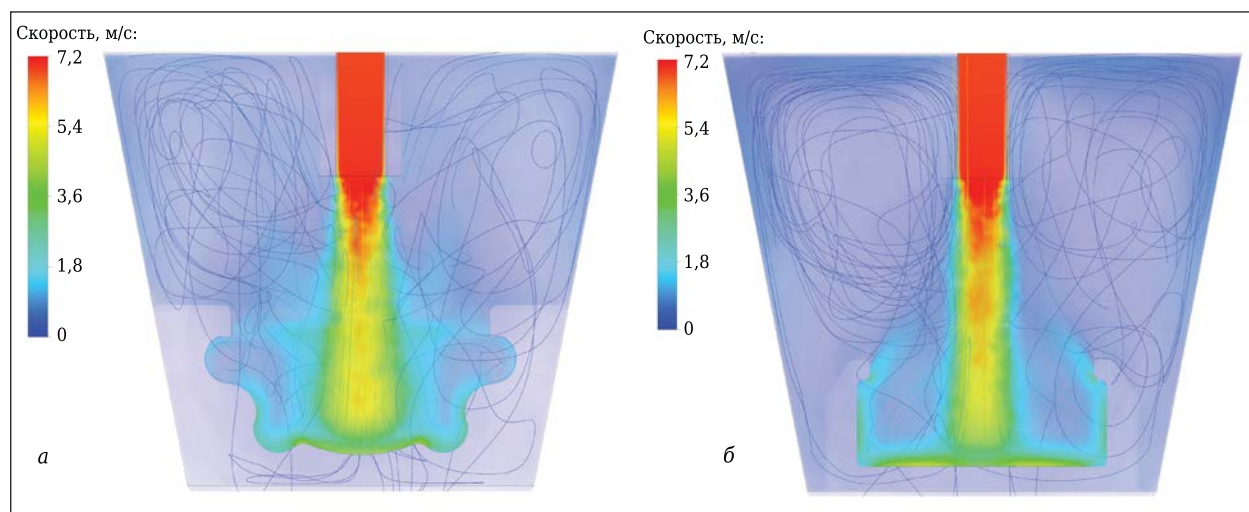


Рис. 5. Моделирование движения потоков металла в объеме металлоприемника при поперечном разрезе 27-т промежуточного ковша в приемной зоне: а — металлоприемник с прямыми стенками (форма задана на основании данных [6]); б — металлоприемник с волнообразной внутренней поверхностью (бренд РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®)

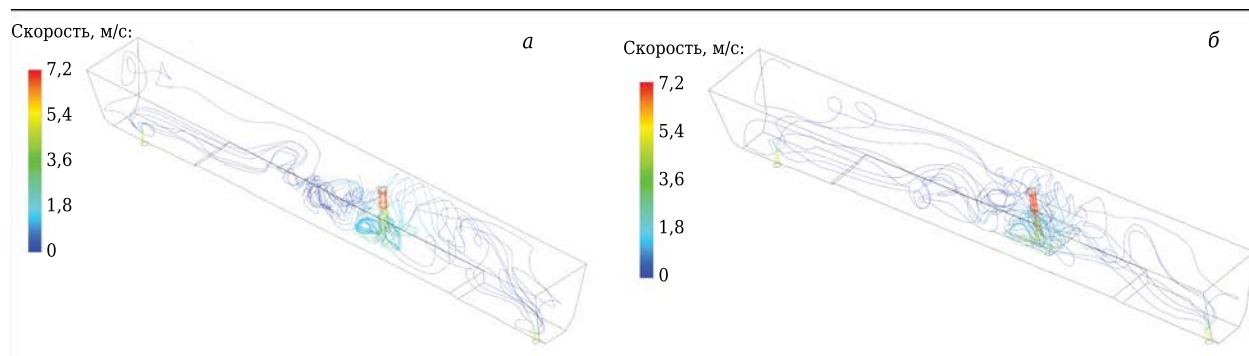


Рис. 6. Результаты моделирования распределения потоков жидкой стали в 27-т промежуточном ковше ККЦ ПАО «Северсталь» при использовании в приемной зоне металлоприемника с прямыми стенками (а) и с волнообразной внутренней поверхностью (б)

– недостаточное гашение турбулентности поступающей в промежуточный ковш струи в объеме металлоприемника с прямыми стенками (см. рис. 6, а), существенную неоднородность распределения потоков по объему промежуточного ковша, присутствие застойных (кольцевых) зон;

– практически полное гашение турбулентности струи в объеме металлоприемника с волнообразной внутренней поверхностью (см. рис. 6, б), более равномерное распределение потоков по объему промежуточного ковша, чем в предыдущем варианте, отсутствие застойных зон.

Оценка средней скорости движения металла за пределами приемной зоны в промежуточном ковше с разными металлоприемными конструкциями составляет 0,3 м/с с «бойной» плитой, 0,2 м/с с металлоприемником с прямыми стенками и 0,1 м/с с металлоприемником с волнообразной внутренней поверхностью. Лучшая организация потоков при использовании металлоприемника с волнообразной внутренней поверхностью и разница в средних скоростях движения металла указывает на большую эффективность конструкции металлоприемника Группы «Магнезит».

Конструкция металлоприемника с волнообразной внутренней поверхностью была апробирована в 2013 г. в условиях ККЦ комбината «Северсталь» в 27-х промежуточных ковшах. Результаты как по стойкости самих изделий, так и по чистоте стали получили положительный отзыв потребителя, в результате чего производятся регулярные поставки металлоприемников РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®. Можно утверждать, что металлоприемник этой конструкции прошел проверку временем: поставлено более 1000 изделий, получены положительные заключения от комбината «Северсталь». Следует отметить, что комбинат «Северсталь», являясь

одним из ведущих сталеплавильных предприятий Российской Федерации, постоянно повышает требования как к огнеупорам (в том числе и для разливки), так и к собственному металлу. В таких условиях металлоприемники с волнообразной внутренней поверхностью вносят свой вклад в обеспечение заданной серийности разливки и производство слывов требуемой чистоты по НВ. Со стороны металлоприемников результат достигается за счет организации движения потоков в промежуточном ковше [7], а чистота слывов по НВ — в результате строгого соблюдения технологических требований к выплавке, внепечной обработке и разливке стали в ККЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Группа «Магнезит» производит и поставляет металлоприемные устройства, в том числе изделия под брендом РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®. Результатом многочисленных инновационных исследований коллектива Группы «Магнезит» является запатентованное металлоприемное устройство с волнообразной внутренней поверхностью, способствующее гашению турбулентности падающей струи в своем объеме, организации потоков металла и удалению НВ в промежуточном ковше. Это в конечном итоге повышает технологичность разливки стали и качество разлитого металла.

С применением металлоприемников с волнообразной внутренней поверхностью только за 2016–2017 гг. в ККЦ комбината «Северсталь» разлито более 1,5 млн т стали. С 2013 г. и до настоящего времени при все более ужесточающихся требованиях к чистоте металла по НВ металлоприемник с волнообразной внутренней поверхностью продолжает соответствовать требованиям потребителя и вносить свой вклад в получение слывов требуемого качества.

Библиографический список

1. Аксельрод, Л. М. Роль огнеупоров в производстве «чистой стали» / Л. М. Аксельрод, И. В. Кушнерев // Сб. тр. XIV конгресса сталеплавильщиков (Москва – Электросталь, 17–21 октября 2016 г.). — Москва – Электросталь, 2016. — С. 36–47.
2. Носоченко, О. В. Технология ввода реагентов в промежуточный ковш при разливке стали на МНЛЗ / О. В. Носоченко, Д. А. Ливший, А. Я. Бабанин [и др.] // Сталь. — 2007. — № 6. — С. 13–16.
3. Филиппов, Г. А. Влияние стабилизации температуры стали в промежуточном ковше УНРС плазменным способом на однородность механических свойств листа после прокатки НЛЗ / Г. А. Филиппов, А. С. Тюфтяев, М. Х. Гаджиев [и др.] // Металлург. — 2016. — № 3. — С. 49–53.
4. Тассо, П. Промежуточный ковш как металлургический реактор / П. Тассо, Н. Райхерт, К. Уиллоуби [и др.] // Черные металлы. — 2012. — № 7. — С. 50–56.

5. НЛМК-Калуга установил новый рекорд производительности // [Электронный ресурс]. Сайт ПАО «НЛМК». URL: <https://nlmk.com/ru/media-center/news-companies/nlmk-kaluga-ustanovil-novyy-rekord-proizvoditelnosti/> (дата обращения: 16.02.2018).

6. Лонгинов, А. М. Моделирование дизайна 27-х промежуточного ковша МНЛЗ сталеплавильного производства / А. М. Лонгинов, В. В. Тиняков, С. В. Никонов [и др.] // Сталь. — 2012. — № 6. — С. 17, 18.

7. Аксельрод, Л. М. Производство чистой стали и современные огнеупорные технологии / Л. М. Аксельрод, И. В. Кушнерев, С. В. Сухарев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 7. — С. 3–11. ■

Получено 10.04.18

© М. Ю. Турчин, С. В. Сухарев,
А. В. Заболотский, А. В. Шестаков,
А. А. Бердышев, А. В. Скрипник, 2019 г.