

**А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко\*, А. П. Верзилов,  
Ю. Ю. Кулиш**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\* ООО «ГИР-ИНТЕРНЭШНЛ», Днепропетровск

## **ДВУХКАМЕРНЫЙ МЕТАЛЛОПРИЁМНИК ДЛЯ РАЗЛИВКИ СТАЛИ СВЕРХДЛИННЫМИ СЕРИЯМИ НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СЕМИРУЧЬЕВОЙ СОРТОВОЙ МНЛЗ**

*Выполнены исследования движения потоков стали в семиручевом промежуточном ковше сортовой машины непрерывного литья заготовок. Показано, что для обеспечения разливки сверхдлинными сериями целесообразно обеспечить рациональное движение циркуляционных потоков, которое достигается при применении двухкамерного металлоприёмника колодецеобразного типа. В ходе промышленных исследований достигнутая серийность разливки составила 37 плавов при продолжительности 53 ч.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, промежуточный ковш, металлоприёмник, ручей, серия, поток.

*Виконано дослідження руху потоків сталі в семирівчаковому проміжному ковші сортової машини безперервного лиття заготовок. Показано, що для забезпечення розливання наддовгими серіями доцільно забезпечити раціональний рух циркуляційних потоків, що досягається при застосуванні двокамерного металоприймача колодезеподібного типу. У ході промислових досліджень досягнута серійність розливання склала 37 плавов при тривалості розливання 53 годн.*

**Ключові слова:** безперервне розливання, проміжний ківш, металоприймач, рівчак, серія, потік.

*The studies of traffic flows steel seven strands CCM tundish had been investigated. It is shown that for very long casting sequences advisable to ensure the optimal movement of flow patterns. It is achieved by the application of a dual-chamber tundish box of well configuration type. During the industrial trials it was achieved sequence of 37 casting in the duration of 53 hours.*

**Keywords:** continuous casting, intermediate ladle, crucible, strand, sequence, flow.

Современные мощные сталеплавильные цеха, которые производят сортовую непрерывнолитую заготовку, характеризуются наличием в своём составе высокопроизводительных многоручьевых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Количество ручьев и скорость разливки, которая может составлять 250-300 т/ч и более, на таких машинах зависит от удельной производительности плавильного агрегата (конвертера или дуговой сталеплавильной печи). В большинстве случаев технологи стремятся согласовывать работу плавильного агрегата и МНЛЗ в единой дискретно-непрерывной системе. При этом немаловажным фактором оказывается ритмичность подачи ковшей стали на МНЛЗ при обеспечении процесса разливки сверхдлинными сериями (до 80-100 ч) без замены промежуточного ковша [1-4].

Рассмотренные в многочисленных работах методические подходы для физического и математического моделирования основных гидродинамических явлений, происходящих в жидкой ванне многоручьевого промежуточного ковша, могут быть распространены на другие конфигурации только при соответствующей коррекции моделей [5-13]. При этом наиболее существенные отличия могут наблюдаться для

многоручьевых сортовых МНЛЗ с чётным и нечётным количеством ручьёв. Это объясняется, главным образом, тем, что при нечётном количестве ручьёв стакан-дозатор среднего ручья находится в центре промежуточного ковша в непосредственной близости от места падения струи. Соответственно горячая сталь, падающая из сталеразливочного ковша, практически сразу попадает в область стакана-дозатора и затем в кристаллизатор. В случае отсутствия специального металлоприёмника и перегородок, температура стали в кристаллизаторе среднего ручья может быть выше, чем на крайних ручьях на 20-25 °С (для семиручьевой МНЛЗ).

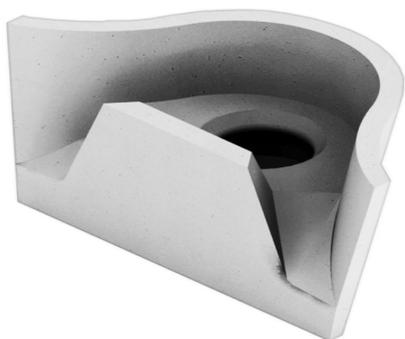
В настоящей работе выполнены комплексные исследования особенностей разливки стали на семиручьевой высокопроизводительной сортовой МНЛЗ с целью оптимизации условий движения и перемешивания стали в промковше при литье сверхдлинными сериями открытой струей при использовании металлоприёмника колодцеобразного типа.

В качестве объекта исследований выбран семиручьевой промежуточный ковш сортовой МНЛЗ конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» (конструкция МНЛЗ фирмы Siemens-VAI). Масса плавки в конвертере в среднем составляет 230 т. Номинальная вместимость промежуточного ковша равна 32-34 т при длине его внутренней полости 7,4-7,5 м и расстоянии между ручьями 1,1 м. При разливке, например, сортовой заготовки сечением 160х160 мм скорость вытяжки заготовки достигает 3,2-3,3 м/мин и, соответственно, требует подачи стали в промежуточный ковш с расходом 4,4-4,5 т/мин.

Предварительный анализ работы промежуточного ковша показал, что использование металлоприёмника типа «турбостоп» (в соответствии с рекомендациями поставщика МНЛЗ) приводит к интенсивному износу футеровки в районе дельты и прямой стенки промежуточного ковша в зоне среднего ручья, что, как правило, лимитирует длительность серии 10-12 плавками.

В результате выполненных исследований на физической модели [10, 11] установлено, что работа семиручьевого промежуточного ковша характеризуется повышенной турбулентностью потоков в его средней части (область падения струи), а также наличием так называемых «мёртвых» зон между первым и вторым, а также шестым и седьмым ручьями.

Для стабилизации процесса разливки в настоящей работе предложен комбинированный (двухкамерный) металлоприёмник колодцеобразного типа (рис. 1) с гасителем турбулентности [14]. Комбинированный металлоприёмник имеет дополнительную внутреннюю камеру с бандажом, что обеспечивает торможение падающей струи и уменьшает турбулизацию потоков. В результате этого удаётся предотвратить интенсивное перемешивание металла и шлака у стен промежуточного ковша в зоне падения струи. Основной эффект достигается за счёт взаимного



а



б

Рис. 1. Общий вид комбинированного металлоприёмника (а) и фотография его установки в промежуточном ковше (б)

гашения, поступающего из ковша и отражённого от днища потоков стали. Этот эффект обуславливается выбором оптимального объёма нижней камеры металлоприёмника (в зависимости от удельного расхода стали и высоты её налива), а также диаметром внутреннего отверстия между верхней и нижней камерами. При этом обеспечивается низкоскоростное движение циркуляционных потоков в направлении дальних стенок промежуточного ковша, что способствует усреднению металла по химическому составу и температуре и предотвращает повышенный локальный износ футеровки промежуточного ковша.

В ходе физического моделирования установлено, что высокоскоростная струя металла, падающая из стелеразливочного ковша, проникает в нижнюю камеру, отражается от днища и образует турбулентный подпор. После этого металл заполняет верхнюю камеру металлоприёмника, где образуется зона с низкими скоростями движения потоков жидкого расплава. Благодаря имеющейся перегородке, квазиламинарные потоки металла равномерно распределяются по выпускающим каналам и оттуда попадают в жидкую ванну промежуточного ковша, двигаясь вдоль границы раздела фаз шлак-металл.

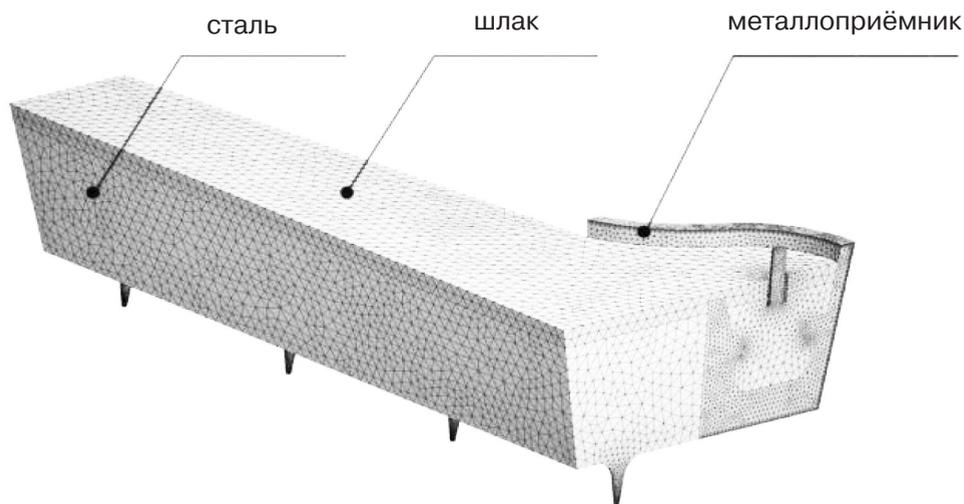
Оптимизация геометрических параметров металлоприёмника была выполнена с помощью математического моделирования перемещения потоков стали в жидкой ванне промковша. Основные критерии, используемые для оптимизации, – отсутствие зон повышенной турбулентности в областях, прилегающих к футеровке промковша, минимизация количества и протяжённости, так называемых, «мертвых» зон, а также примерно равное время перемещения стали от металлоприёмника до любого стакана-дозатора промковша. Наиболее сложным, как показали исследования, является соблюдение последнего условия, которое удаётся выполнить при определённых геометрических размерах и конфигурации выходных окон металлоприёмника.

Математическое моделирование движения потоков жидкости в промковше выполнено с применением прикладного пакета ANSYS с использованием трёхмерной модели, в которой учитывались как гидродинамические эффекты, так и перепады температуры в различных точках жидкой ванны. В целом выполненные исследования хорошо коррелируются с результатами, полученными в ходе физического моделирования. Это, прежде всего, относится к направлению движения основных конвективных потоков и их поведению в областях, прилегающих к стенкам промковша.

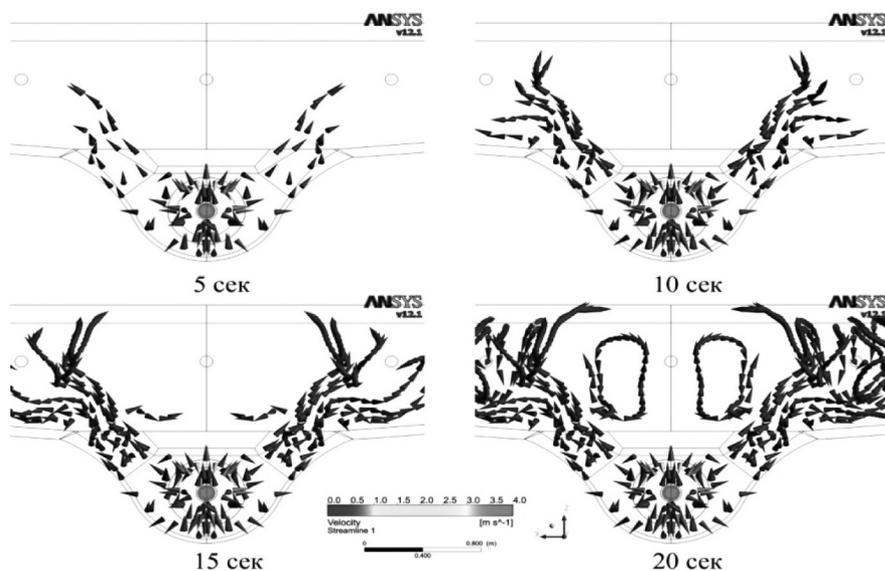
Вытекающие из металлоприёмника потоки стали первоначально перемещаются вдоль зеркала металла к дальним ручьям и попадают в периферийную зону объёма промежуточного ковша (рис. 2). Затем потоки жидкости плавно меняют направление движения на преимущественно нисходящие к днищу, которые продолжают движение как к крайним, так и к средним стаканам-дозаторам. Фактически представленная схема движения потоков характеризуется отсутствием зон критической турбулентности (в том числе и у поверхности раздела шлак-металл), а также «мёртвых» зон, которые слабо вовлекаются в процесс перемешивания. Это особенно важно в случае разливки металла сверхдлинными сериями в плане обеспечения стабильности процесса литья. При этом рассмотренная картина движения конвективных потоков в основном сохраняется при падении уровня расплава в промежуточном ковше на 20-25 %.

Для предотвращения прямого попадания стали в средний ручей в конструкции металлоприёмника предусматривается специальная перегородка. Основным конструкционным параметром этого элемента является высота перегородки. Как видно из результатов расчётов, приведённых на рис. 3, наличие перегородки, высота которой превышает уровень металла в промежуточном ковше, достаточно сильно снижает скорости движения циркуляционных потоков в горизонтальной плоскости. По-нашему мнению, в этом случае износ рабочего слоя огнеупоров будет меньше, чем при перегородке, которая будет расположена ниже уровня металла в промежуточном ковше.

Промышленные испытания комбинированного металлоприёмника, разрабо-



а



б

Рис. 2. Общий вид расчётной модели (метод конечных элементов, трёхмерная задача – (а) и результаты расчёта движения расплава в центральной части промежуточного ковша при использовании комбинированного металлоприёмника (вид сверху) – (б)

танной в настоящей работе конструкции, выполнены в условиях сортовой МНЛЗ конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» при разливке конструкционных марок стали длинными сериями с использованием защитной трубы. Материал металлоприёмника – шпинель (содержание  $Al_2O_3 > 45\%$ ;  $MgO > 35\%$ ).

Внешняя поверхность конструкции металлоприёмника полностью учитывала конфигурацию внутренней полости промежуточного ковша в зоне дельты, что обеспечивало его плотную фиксацию при установке (рис.1, б). Визуальный осмотр металлоприёмников после разливки серии плавков, отлитых менее установленной нормы (21 плавка – 30 ч и 20 плавков – 28 ч), показал, что их состояние оказалось вполне удовлетворительное. При этом задняя (дельтовидная) стенка в районе

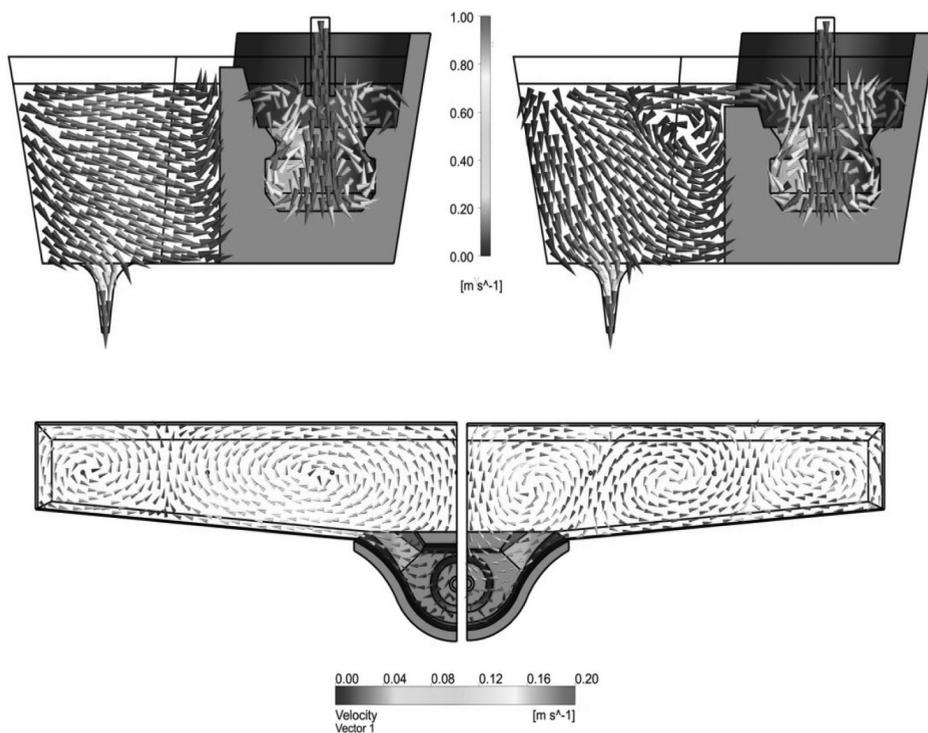


Рис. 3. Диаграммы распределения циркуляционных потоков в промежуточном ковше в вертикальной и горизонтальной плоскостях: слева – при наличии высокой перегородки; справа – при низкой перегородке, заглублённой в металл

сливного носка практически не изношена, а остаточная толщина боковых стенок металлоприёмника составляла от 70 мм до 90 мм, что гарантирует возможность их дальнейшей беспрепятственной эксплуатации.

Состояние металлоприёмника после разливки 30 плавков (43 ч эксплуатации) показало, что остаточная толщина боковых стенок составляет не менее 70-75 мм, задняя стенка в районе сливного носка практически не была изношена. Днище металлоприёмника обеспечило указанную стойкость, но остаточная толщина днища составила только 35-40 мм.

При проведении экспериментальных серий разливки выполнено оценку степени бурления поверхности жидкой ванны в промежуточном ковше в районе защитной трубы. Установлено, что поверхность жидкого расплава в приёмной зоне преимущественно характеризуется отсутствием турбулентности и интенсивных вихревых движений и всплесков. Оголение поверхности зеркала металла наблюдается только на небольшом участке, прилегающем к внешней поверхности защитной трубы (рис. 4)

В целом использование в промежуточных ковшах комбинированных металлоприёмников имеет следующие преимущества по сравнению с существующей технологией применения приёмных устройств (типа «турбостоп») и различного рода защитных 3-х секционных плит:

- в процессе разливки большой серии плавков обеспечивается стабильное направленное движение циркуляционных потоков металла в жидкой ванне, что предохраняет от размыва футеровку в области падения струи металла из сталеразливочного ковша и центральной части передней стенки;

- конструкция металлоприёмника учитывает расположение стаканов-дозаторов в днище промежуточного ковша многоручьевых МНЛЗ, в том числе и предотвращает попадание «горячих» порций металла в средний ручей;

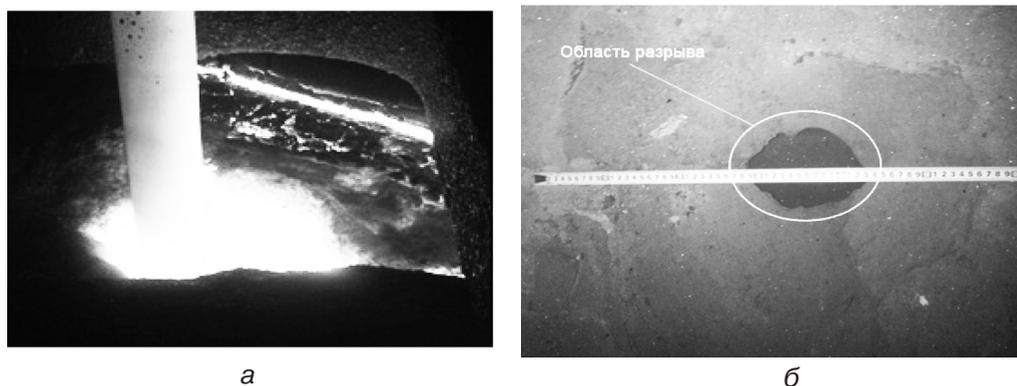


Рис. 4. Приёмная зона металлоприёмника при разливке с защитной трубой (а) и днищ промежуточного ковша после прогара, разрушения (б)

– во время удаления остатков металла из промежуточного ковша, после разливки серии плавков, снижается нагрузка на машину кантовки, так как происходит отделение металлоприёмника из дельтообразной части ковша в районе сливного носка практически без применения штоков.

Всего в условиях КЦ ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» использовано более 450 металлоприёмников разработанной конструкции. Проведённые испытания таких металлоприёмников подтвердили их высокую функциональность и эксплуатационную стойкость. Максимальная (рекордная) достигнутая серийность разливки составила 37 плавков при продолжительности разливки 53 ч. Это позволило разлить ~8460 т стали в серии из одного промежуточного ковша. При этом остаточная толщина стен после разливки указывает на возможность дальнейшего увеличения серийности разливаемых плавков.

Между тем достаточно часто лимитирующим разливку звеном оказывается критический износ днища металлоприёмника, прямым следствием которого может стать прогар днища ковша в области падения струи. При этом динамика износа днища металлоприёмника характеризуется значительной неравномерностью, что позволяет предположить существование условий, которые радикально влияют на износ футеровки.

На основании отобранных данных (30 серий, 703 плавки) в работе выполнена оценка эрозионной стойкости днища металлоприёмника, которая базируется на применении регрессионного анализа. Параметры уравнения регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов. Для оценки степени связи между выбранными величинами использовался коэффициент множественной корреляции Пирсона (R). Адекватность построенного уравнения данным генеральной совокупности проверялась статистической значимостью коэффициента детерминации на основе критерия Фишера (F).

Уравнение регрессии, позволяющее прогнозировать остаточную толщину днища металлоприёмника ( $y$ ), имеет следующий вид:

$$y = 49,7090 - 2,5696x_1 + 0,5866x_2 + 0,1256x_3 - 12,6927x_4 - 0,0301x_5, \quad (1)$$

где:  $y$  – остаточная толщина днища металлоприёмника, мм;  $x_1$  – количество падений уровня металла в промежуточном ковше при замене ковшей (соответствует количеству плавков в серии);  $x_2$  – время разливки серии плавков (объединяет скорость разливки и массовый расход), мин;  $x_3$  – среднее в серии значение уровня налива металла в промковше, мм;  $x_4$  – количество падений уровня металла в промежуточном ковше более, чем на 300 мм (не учитывая падения при перековшовках);  $x_5$  – средняя температура стали в серии, °С.

В выполненных исследованиях 97,8 % общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков. Следовательно, выбранные для статистического анализа технологические факторы, существенно влияют на скорость износа металлоприёмника, что подтверждает правильность их включения в построенную модель. Рассчитанный уровень значимости критерия Фишера  $F = 4 \cdot 10^{-5} < 0,05$  подтверждает значимость множественного коэффициента детерминации  $R^2$ .

Установлено, что максимальное влияние на износ днища металлоприёмника оказывает количество падений уровня металла в промежуточном ковше в ходе разливки, а также в процессе замены сталеразливочного ковша. Соответственно наиболее реальным путём повышения стойкости днища металлоприёмника может быть предотвращение падения уровня металла в промковше ниже определённых критических значений (например, ниже 500-550 мм). Это может быть достигнуто за счёт снижения скорости вытяжки заготовки на отдельных ручьях или путём временной остановки работы одного из ручьёв.

Полученная зависимость (1) позволяет также прогнозировать динамику уменьшения толщины днища и рассматривать возможные конструктивные изменения в нижней части металлоприёмника при изменении параметров литья, например, при повышении производительности МНЛЗ в условиях действующего производства.

### Выводы

В результате выполненных на физической и математической моделях исследований показано, что при определённых размерах и конфигурации металлоприёмника могут быть созданы такие условия, которые будут ограничивать турбулентное перемешивание металла с покровным шлаком в зоне металлоприёмника и формировать циркуляционные потоки, которые обеспечат усреднение металла в жидкой ванне промежуточного ковша.

Установлено, что оптимальное перемешивание стали в промежуточном ковше семиручьевой сортовой МНЛЗ удаётся достигнуть при использовании комбинированного металлоприёмника колодцеобразного типа, который оснащён двумя рабочими камерами. При этом нижняя камера, благодаря её конфигурации, обеспечивает торможение потока стали, падающего из сталеразливочного ковша. Это предотвращает возникновение зон критической турбулентности (в том числе и у поверхности раздела шлак-металл), а также «мёртвых» зон, которые слабо вовлекаются в перемешивание.

В ходе промышленных исследований подтверждена высокая работоспособность, разработанного в настоящей работе, комбинированного металлоприёмника. Максимальная (рекордная) достигнутая серийность разливки составила 37 плавов при продолжительности разливки 53 ч. Показано, что наиболее быстро изнашивающимся элементом конструкции металлоприёмника является днище, на стойкость которого оказывает влияние количество падений уровня металла в промежуточном ковше в ходе разливки.



### Список литературы

1. Wolf M. Bloom and Billet Casting: Overview // Proceedings 3<sup>rd</sup> European Conference on Continuous Casting, Madrid (Spain), October 20-23, 1998. – Madrid: 1998. – P. 515-524.
2. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка сортовой заготовки: монография / А. Н.Смирнов, С. В. Куберский, А. Л. Подкорытов, В. Е. Ухин, А. В. Кравченко, А. Ю. Оробцев. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
3. Birat J.-P. Continuous casting - past, present and future / J.-P. Birat, Ch. Marchionni // Revue de Métallurgie. – 2005. – № 11. – P. 732-737.

4. Шмитт М. Высокие надежность и производительность машин непрерывной разливки сортовой заготовки на заводе Badische StahlWerke / М. Шмитт, А. Фолкерт, Ж. Барбе и др. // Сталь. – 2008. – № 2. – С. 22-23.
5. Шалимов А. Г. Высокоскоростная непрерывная отливка стальных заготовок / А. Г. Шалимов // Новости чёрной металлургии за рубежом. – М.: ОАО «Черметинформация». – 2003. – 28 с.
6. Michalek K. Optimization on Molten Steel Flow in Billet Continuous Casting Tundish at Trinecke Zelezarny / K.Michalek, J.Pindor, R.Lebeda e. a. // Proceedings Continuous Casting of Billets. 2-nd Intern. Conf. Trinec (Czech rep.). – Trinec: 1997. – P. 59-69.
7. Смирнов А. Н. Совершенствование конструкции металлоприёмника промежуточного ковша для разливки стали сверхдлинными сериями / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. Л. Подкорытов, А. П. Верзилов // ОАО «Черметинформация». Бюл. Чёрная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 44-47.
8. Смирнов А. Н. Оптимизация движения конвективных потоков в промковшах многоручьевых МНЛЗ при разливке сверхдлинными сериями / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. Л. Подкорытов // ОАО «Черметинформация». Бюл. Чёрная металлургия. – 2012. – № 11. – С. 39-44.
9. Подкорытов А. Л. Комплексный подход к футеровке промежуточных ковшей с целью увеличения серийности разливки открытой струей / А. Л. Подкорытов, П. Вульф, И. Ю. Симеон, А. А. Кондрукевич, Г. И. Котельников, Н. С. Съемщиков, А. В. Гурский, С. М. Стриченко // Сталь. – 2013. – № 1. – С. 13-17.
10. Смирнов А. Н. Физическое моделирование процессов развития конвективных потоков и износа металлоприёмников в промежуточных ковшах многоручьевых МНЛЗ / А. Н. Смирнов, А. П. Верзилов, В. Г. Ефимова, Д. И. Гойда, Р. В. Пильгаев // Процессы литья. – 2015. – № 1. С.30-38.
11. Смирнов А. Н. Совершенствование конструкции металлоприёмника промковша для разливки стали сверхдлинными сериями / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов, А. Л. Подкорытов // Металлургическая и горная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 229-231
12. Dorricott J. D. Asymmetric Tundish Design and Flow Control Principles in Multistrand Billet and Bloom Casters / J.D.Dorricott, L.J.Heaslip, P.G.Hoagland // Electric Furnace Conf. Proc. (ISS). – 1990. – Vol. 48. – P. 119-124.
13. Jha P. K. Mixing in a Six Strand Billet Tundish: A Parametric Study / P. K. Jha, S. K. Dash, S. Kumar // ISIJ International. 2001. Vol.41. No.12. – P.1437-1446.
14. Патент на винахід №99247 (Україна). Металоприймач для проміжного ковша / А. О. Сердюков, О. М. Смірнов, А. Ф. Тонкушин, А. В. Кравченко. – Опубл. 25.07.2012. Бюл. 14.

Поступила 06.07.2015

**К сведению читателей**

**и подписчиков!**

**Телефон редакции**

**журнала «Процессы литья»:**

**(044) 424-04-10**