

УДК 621.746

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ ВО ВРЕМЯ ЗАМЕНЫ ПОГРУЖНЫХ СТАКАНОВ

Еронько С.П.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии» (ersp@meta.ua)

Золотухин В.И.^{2,3}, д.т.н., профессор кафедры «Сварка, литье и технологии конструкционных материалов», генеральный директор (info@vulkantm.com)

Ткачев М.Ю.¹, ассистент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»

Провоторов Д.А.^{2,3}, к.т.н., инженер кафедры «Технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств»

Ошовская Е.В.¹, к.т.н., доцент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»

¹ **Донецкий национальный технический университет**
(83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

² **Тульский государственный университет**
(300012, Россия, Тула, пр. Ленина, 92)

³ **Научно-производственное предприятие «Вулкан-ТМ»**
(300057, Россия, Тула, ул. Алексинское шоссе, 34)

Аннотация. Освещены результаты анализа направлений и современных методов исследований в области непрерывной разливки стали, связанных с выявлением и устранением факторов, оказывающих негативное влияние на качество поверхности непрерывнолитых заготовок. Показано, что существующая концепция построения систем быстрой смены погружных стаканов, эксплуатируемых на слябовых МНЛЗ, приводит к формированию на каждом ручье машины в течение серийной разливки 20 плавок некондиционного участка заготовки длиной 30 – 40 м, образующегося в итоге из-за нестабильных гидродинамических условий в кристаллизаторе. Приведены результаты исследования на физической модели изменений траектории и скорости движения потоков металла в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ, связанных с заменой погружных стаканов в процессе серийной разливки стали, а также предложены рекомендации по снижению длительности негативного воздействия данного фактора на условия формирования отливаемой заготовки. При помощи контрольно-измерительного комплекса с тензорезисторным преобразователем установлено, что перепад скоростей жидкостных потоков у противоположных узких стенок модели кристаллизатора, вызывающий нарушение тепловых условий формирования корочки непрерывнолитой заготовки, в случае использования прямоточных погружных стаканов может достигать значений 2,0 – 2,3, а для безнапорных глухонных стаканов с двумя боковыми отверстиями, разделенными рассекателем, 1,2 – 4,0. С использованием материалов скоростной видеосъемки также получена информация о нарушении симметрии траектории циркуляционных контуров потоков расплава в кристаллизаторе, обусловленном проведением операции замены изношенного погружного стакана. В ходе исследований визуализацию траекторий движения потоков воды, имитировавшей жидкую сталь, в модели кристаллизатора обеспечивали введением воздуха через канал модели стопора-моноблока промежуточного ковша, благодаря чему симулировали подачу аргона во время разливки. Полученные сведения позволили разработать новый принцип построения системы быстрой смены погружных стаканов, заключающийся в совмещенном и параллельном выполнении ее структурными элементами (манипулятором, разливочным и переталкивающим устройствами) отдельных этапов процесса замены огнеупорных изделий. Это позволяет сократить временные затраты на смену изношенного погружного стакана и повысить выход годного при производстве слябовой заготовки на МНЛЗ.

Ключевые слова: непрерывная разливка, погружной стакан, кристаллизатор, физическая модель, потоки металла, длительность смены стакана, манипуляционная система.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-520-526

Качество поверхности, структура прилегающего к ней слоя и количество внутренних дефектов непрерывнолитой заготовки в значительной мере зависят от стабильности потоков металла в кристаллизаторе МНЛЗ [1 – 7]. Поэтому ряд исследований последних лет, проводившихся в области непрерывной разливки стали, был связан с поиском оптимальных геометрических параметров и способов формирования [8] погружных стаканов, по-

вышающих равномерность скоростей циркулирующих слоев жидкого металла, а также с совершенствованием систем его электромагнитного перемешивания и торможения в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок [9 – 12]. При этом для получения исходной информации и проверки правильности принимаемых технических решений широко использовали методы математического и физического моделирования [13 – 16].

Следует отметить, что во время непрерывной разливки стали большими сериями стал проявляться еще один фактор, дестабилизирующий гидродинамику потоков в верхней части кристаллизатора слябовой МНЛЗ. Речь идет о возмущениях, вносимых в картину распределения зон циркуляции жидкой стали износившимися и резервным погружными стаканами, последовательно совершающими движение по сложной траектории в полости кристаллизатора в ходе проведения их смены [17 – 18]. Как показали результаты хронометража, продолжительность процесса замены отработанного защитного огнеупорного изделия составляет 1,5 – 2,0 мин, а выполнение такой замены происходит не менее одного раза за время разливки одной плавки. Отсюда следует, что при скорости разливки на слябовой МНЛЗ 1 м/мин и среднем числе плавки в серии 20, на каждом ручье машины формирования 30 – 40 м заготовки происходит в нестабильных гидродинамических условиях, неблагоприятно влияющих на ее качество.

В связи с этим, с целью оценки степени влияния условий реализации процесса замены погружных стаканов на траекторию и скорость циркуляции потоков металла в полости кристаллизатора с большим поперечным сечением, выполнено исследование на физической модели нарушения симметрии картины циркуляционных контуров, возбуждаемых в зонах, прилегающих к узким граням отливаемой заготовки. Информация о траектории потоков и значениях их скоростей позволит получить исходные данные, необходимые для разработки комплекса мероприятий, способствующих минимизации временных затрат на смену вышедшего из строя огнеупорного изделия.

Для проведения экспериментов была изготовлена лабораторная установка, схема которой показана на рис. 1. Она включала прозрачные плоские модели промежуточного ковша 5 и кристаллизатора 8, закрепленные на металлоконструкции 15. Разливочная система модели промежуточного ковша состояла из механизма 3 управления положением стопора-моноблока 4, обеспечивающего дозированный перелив жидкости, симулирующей расплав, а также устройство 12 для замены отработанного погружного стакана 11 резервным 7 с помощью специального толкателя 6. Конструктивной особенностью модели кристаллизатора слябовой МНЛЗ было то, что отток из нее жидкости происходил через многочисленные отверстия малого диаметра, равномерно распределенные в ее днище, благодаря чему устранялось возможное искажение картины потоков, формируемой в зоне расположения моделей погружных стаканов. Модельная жидкость, собираемая с помощью штуцеров 9 в общую емкость, затем по трубопроводу подавалась насосом 10 в канал модели шибберного затвора 14, снабженного защитной трубой 13. Для вдувания воздуха в выпускной канал модели промежуточного ковша воздуха, имитирующего аргон, служили

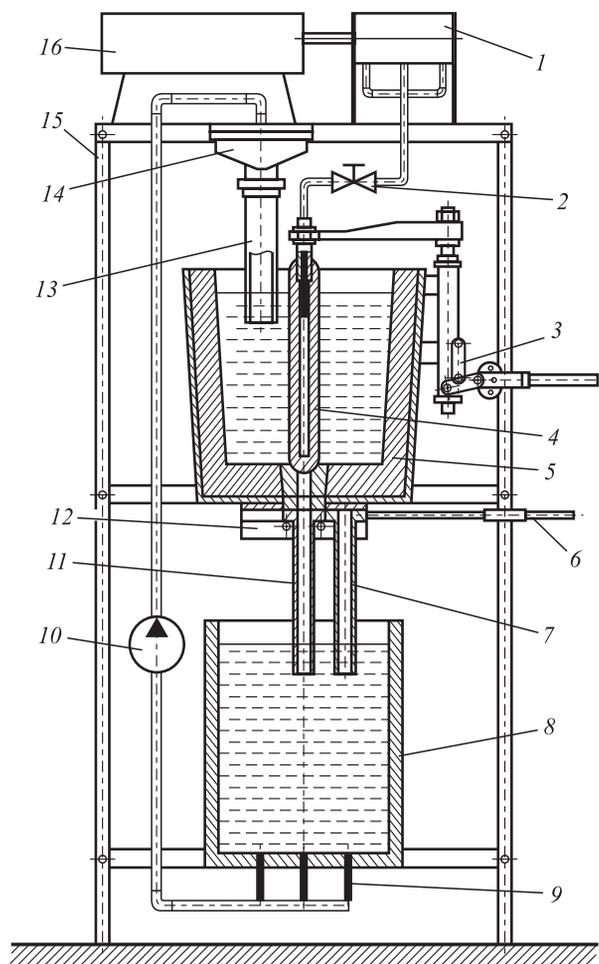


Рис. 1. Схема лабораторной установки для моделирования процесса смены погружных стаканов

Fig. 1. Scheme of the laboratory device for simulation of submerged nozzles changing process

компрессор 16 и ресивер 1. Регулирование расхода подаваемого воздуха обеспечивали с помощью крана 2.

Масштабы моделирования разливки слябовой заготовки сечением 1000×250 мм, вытягиваемой со скоростью 1,0 – 1,2 м/мин, определили с учетом автомодельности относительно числа подобия Рейнольдса (Re), значение которого составляло $Re = 1220$.

Для контроля скорости жидкостных потоков использовали измерительный зонд, снабженный тензорезисторным преобразователем и схематично показанный на рис. 2. Он состоял из полой штанги 1, на конце которой закреплен стеклянный баллон 2 с консольно заземленным в его полости упругим элементом 3 в виде пластинки. На противоположных поверхностях этой пластинки наклеены фольговые тензодатчики сопротивлением 200 Ом, соединенные по полумостовой схеме. Баллон герметизирован с помощью резинового колпачка 4, сквозь который проходил соединенный с упругим элементом рычаг 5, снабженный на конце диском 6. При этом для измерения скоростей жидкостных потоков в горизонтальной плоскости приме-

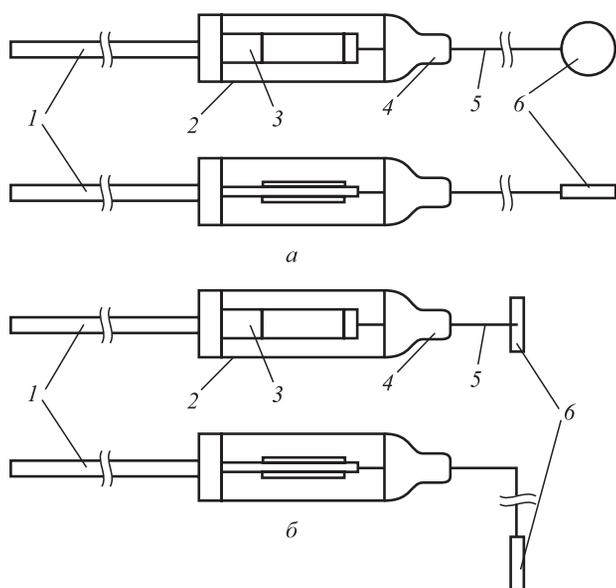


Рис. 2. Схема зонда для контроля скорости жидкостных потоков

Fig. 2. Scheme of the probe for control of fluid flow velocity

няли зонд с прямым рычагом (рис. 2, а), а в вертикальной плоскости – с рычагом, изогнутым под углом 90° (рис. 2, б). Тензорезисторный преобразователь зонда входил в состав контрольно-измерительного комплекса, включавшего также четырехканальный усилитель переменного тока УТ 4-1 (ТУ 25.06.1377-82), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ЭВМ.

Принцип работы зонда состоит в том, что при воздействии на его диск динамического напора жидкостного потока, пропорционального квадрату его скорости, возникает сила, изгибающая упругий элемент с наклеенными датчиками. При деформации датчиков возникает электрический сигнал, позволяющий после усиления, преобразования в цифровой код и соответствующей обработки с помощью программного продукта получить данные о скорости потока модельной жидкости в точке размещения приемного диска зонда.

При исследовании процесса замены погружных стаканов использованы два варианта их моделей. Один комплект включал модели прямооточных стаканов, а другой – модели безнапорных стаканов с двумя боковыми отверстиями, расположенными в нижней части и разделенными рассекателем.

Опыты на лабораторной установке проводили в следующей последовательности. Предварительно в направляющих устройства 12 соосно с выпускным каналом модели промежуточного ковша 5 размещали модель погружного стакана 11, подлежащего замене. Затем при опущенном в нижнее положение стопоре-моноблоке 4 и выключенном насосе 10 модели промежуточного ковша 5 и кристаллизатора 8 заполняли водой до заданных уровней. После одновременного поднятия с помощью механизма 3 стопора-моноблока 4 и пуска насоса 10 путем регулирования его производительности доби-

вались поддержания постоянства уровней жидкости в моделях промежуточного ковша и кристаллизатора, а также включали компрессор 16, закачивающий воздух в ресивер 1, из которого он через регулировочный кран 2 нагнетался в полость стопора-моноблока 4 и далее увлекался потоком жидкости, истекающей через погружной стакан 11 в модель кристаллизатора. Благодаря тому, что при попадании вдуваемого воздуха в струе жидкости в кристаллизатор происходило образование мельчайших пузырьков, обеспечивалась визуализация траекторий движения увлекавших их потоков воды.

Наблюдаемые картины зон циркуляции потоков фиксировали с использованием скоростной видеосъемки с помощью камеры, установленной на штативе на некотором удалении от лабораторной установки. В ходе проводившихся наблюдений симулировали процесс смены погружного стакана. Для этого с помощью специального клещевого захвата модель сменного огнеупорного элемента плавно заводили в полость модели кристаллизатора и устанавливали в направляющие рядом со стаканом, подлежащим замене. После этого, используя толкатель, осуществляли перемещение обоих стаканов на заданное расстояние, в результате чего резервный огнеупор занимал позицию разливки, а отработанный затем убирали из полости кристаллизатора. Опыты в указанной последовательности выполнения операций по замене моделей огнеупорных стаканов проводили для обоих рассматриваемых типов. Просмотр отснятого видеоматериала в динамике и в режиме «стоп-кадр» позволил установить характерные изменения в картинах распределения потоков жидкости в модели кристаллизатора, связанные с воздействием на зону циркуляции имитатора расплава моделей погружных стаканов, последовательно совершающих перемещения в пространстве, необходимые для их смены. Выявленные при этом возмущения, вносимые в картины циркуляционных зон и динамику жидкостных потоков находящимися в полости кристаллизатора погружными стаканами, иллюстрируют кадры видеосъемки и схемы полей скоростей, приведенные на рис. 3, 4. Для полного понимания наблюдавшихся явлений необходимо сделать некоторые комментарии к данным иллюстрациям.

При разливке с использованием прямооточного стакана под уровень (рис. 3, а) наблюдаются каплевидной формы основной нисходящий поток с глубиной проникновения 300 – 400 мм и восходящие вдоль стенок кристаллизатора конвективные потоки, изменяющие направление к погружному стакану при достижении свободной поверхности модельной жидкости. Поля скоростей по обе стороны стороны стакана имеют строгую симметрию.

После завершения размещения сменного погружного стакана рядом с заменяемым (рис. 3, б), симметрия формы основного нисходящего потока нарушается и он частично смещается от центральной вертикальной оси модели кристаллизатора в сторону ее левой узкой стен-

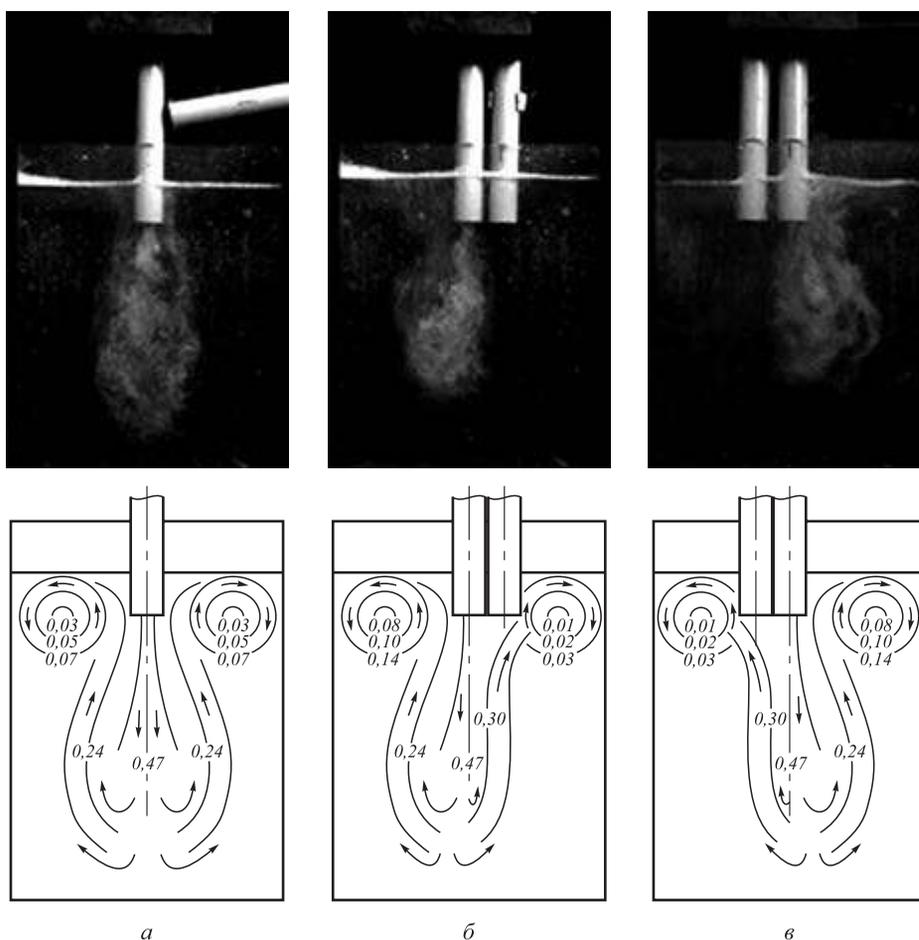


Рис. 3. Картины распределения зон циркуляции и полей скоростей (м/с) жидкостных потоков в модели кристаллизатора, наблюдавшиеся при смене прямооточного погружного стакана

Fig. 3. Distribution patterns of circulation areas and velocities fields (m/s) of fluid flows in the mold model observed during the once-through submerged nozzle changing

ки, а перепад скоростей у противоположных стенок достигает значений 2,0 – 2,3, что в реальных условиях вызовет дестабилизацию процесса формирования корочки отливаемой заготовки [19].

По завершении перевода в позицию разливки резервного погружного стакана (рис. 3, в), находящийся слева от него замененный стакан вносит возмущение в зону циркуляции, в результате чего наблюдается смещение контура основного нисходящего потока от центральной вертикальной оси модели кристаллизатора теперь уже к правой его узкой стенке. Это также приводит к перепаду скоростей потоков по обе стороны погружного стакана, что нарушает стабильность условий формирования корочки заготовки.

При использовании безнапорных погружных стаканов с боковыми отверстиями наблюдается иная структура гидравлических потоков, обусловленная наличием выше и ниже выходных отверстий вихрей с однонаправленной обратной друг к другу циркуляцией с нисходящими потоками вдоль образующей цилиндрической поверхности стакана и восходящими потоками вдоль узких стенок модели кристаллизатора

(рис. 4, а). Поля скоростей жидкостных потоков практически строго симметричны.

Введенный в полость модели кристаллизатора второй (резервный) погружной стакан препятствует свободному истечению жидкости из ближайшего к нему бокового отверстия стакана, подлежащего замене (рис. 4, б), что сразу же вызывает нарушение симметрии траектории и полей скоростей потоков. В этом случае тепловые условия формирования корочки узких граней заготовки будут разными, что отрицательно отразится на ее структуре.

После перемещения резервного стакана на позицию разливки, находящийся слева от него замененный стакан создает препятствие истекающему в его сторону потоку (рис. 4, в) и вносит искажения в картину полей скоростей с перепадами их значений, достигающими 1,2 – 4,0. Это в итоге отрицательно отразится на условиях формирования корочки слитка.

С учетом вышесказанного, по мнению авторов, является логичным утверждение о целесообразности внесения изменений в организацию процесса смены погружных стаканов при непрерывной разливке стали

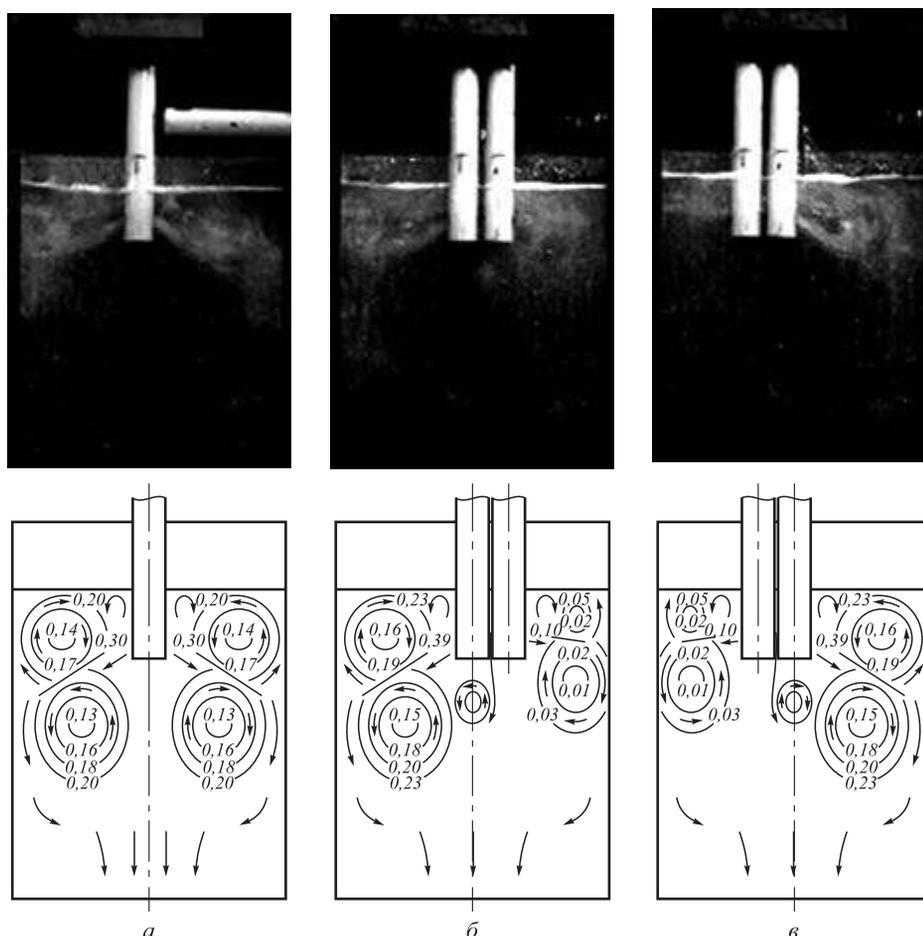


Рис. 4. Картины распределения зон циркуляции и полей скоростей (м/с) жидкостных потоков в модели кристаллизатора, зафиксированные при смене безнапорного погружного стакана с двумя боковыми отверстиями

Fig. 4. Distribution patterns of circulation areas and velocity fields (m/s) of fluid flows in the mold model recorded during nozzle changing of non-pressure submerged nozzles with two lateral holes

на слябовую заготовку, а также разработки новой концепции создания систем для его реализации с минимальными временными затратами.

В соответствии с ранее принятой концепцией построения структуры системы быстрой смены погружных стаканов, ее рассматривают как совокупность взаимосвязанных и вместе с тем самостоятельных устройств, позволяющих осуществить комплекс операций, включающий:

- перемещение в пространстве сменного стакана с позиции загрузки на приемные направляющие разливочного устройства промежуточного ковша;
- проталкивание этого стакана на позицию разливки с одновременным перемещением отработанного стакана с позиции разливки на позицию извлечения;
- удаление данного стакана из рабочей зоны.

При этом из всей совокупности задействованных функциональных устройств значимыми считались только два: разливочное и проталкивающее устройства, а остальные относили к вспомогательным или вообще не брали в расчет в случае выполнения операций по подаче нового и уборке отработанного стаканов вручную [20]. При такой иерархической структуре построе-

ния систем быстрой смены погружных стаканов вспомогательные операции по длительности в несколько раз превышают основные, в связи с чем увеличивается промежуток времени, в течение которого в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ нарушена стабильность организации потоков стали и, как сказано выше, ухудшаются условия формирования отливаемой заготовки.

С целью заметного сокращения продолжительности нахождения в полости кристаллизатора двух погружных стаканов в процессе их смены, предлагается объединить в единую систему разливочное устройство промежуточного ковша и специальный манипулятор в такой комбинации, при которой бы исключались операции, связанные с перемещениями силового гидроцилиндра для перевода его из рабочей позиции в парковочную и последующим возвратом на линию досылания сменного погружного стакана, а также обеспечивалось механизированное выполнение в автоматическом режиме подачи резервного и уборки отработанного огнеупорных элементов, защищающих сталь от вторичного окисления.

Указанные условия функционирования элементов предлагаемой системы можно обеспечить, если сило-

вой гидроцилиндр будет размещаться не на разливочном устройстве, а на манипуляторе, который в свою очередь необходимо укомплектовать дополнительным схватом для удержания отработанного погружного стакана и сообщения ему заданной траектории движения в пространстве при механизированной уборке из полости кристаллизатора [21].

Усовершенствованный манипулятор включает следующие механизмы: подачи сменного стакана к разливочному устройству промежуточного ковша; уборки отработанного стакана из полости кристаллизатора; управления положением базы, используемые соответственно при настройке координат x , y , z .

Выводы. Результаты выполненных модельных исследований позволили обосновать новый подход к созданию системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слябовой МНЛЗ, использование которой позволит сократить в 2 раза общую продолжительность комплекса выполняемых операций и за счет этого уменьшить промежуток времени, в течение которого формирование корочки заготовки протекает в неблагоприятных гидродинамических условиях. В результате повысится выход годной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. – М.: Металлургиздат, 2011. – 432 с.
2. Управление качеством непрерывнолитых заготовок / Д.Х. Десятков, О.С. Логунова, В.Д. Тутарова, И.М. Ячиков. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – 367 с.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
4. Смирнов А.Н., Глазков А.Я., Пилюшенко В.Л. Теория и практика непрерывного литья заготовок. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 364 с.
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
6. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Horizontal HCC-12000 unit for the continuous casting of semifinished products // Metallurgist. 2011. No. 55 (1–2). P. 116–118.
7. Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Верзилов А.П., Максаев Е.Н. Зарастание погружных стаканов слябовой МНЛЗ // Сталь. 2014. № 11. С. 14–18.
8. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories // Metallurgist. 2008. No. 52 (7–8). P. 420–423.
9. Горнаков А.И. Моделирование процесса движения жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного литья стали: Дис. ... канд. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре: Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 2013. – 128 с.
10. Гущин В.Н. Разработка способов технологического воздействия на формирование непрерывнолитых заготовок и слитков и оборудования для их реализации с целью повышения качества металла: Дис. ... док. техн. наук. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, 2011. – 356 с.
11. Коллберг С.Г., Хакль Х.Р., Лехман А.Ф., Эрикссон Я.Э. Традиционная разливка слябов с применением электромагнитных систем // Сталь. 2007. № 5. С. 53–61.
12. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета, 2014. – 348 с.
13. Ерошкин С.Б., Бобылев Г.С., Попович В.Н. и др. Опыт применения погружных стаканов фирмы «Foseco GmbH» на слябовой МНЛЗ ОАО «Северсталь» // Сталь. 2007. № 5. С. 61–66.
14. Еронько С.П., Быковских С.В., Ошовская Е.В. Расчет и конструирование оборудования для внепечной обработки и разливки стали. – Киев: Техніка, 2007. – 344 с.
15. Герасименко В.Г., Чайка Д.В. Физическое моделирование гидродинамики непрерывной разливки // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 264–265.
16. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. Metallurgist. 2011. No. 55 (3–4). P. 163–166.
17. Еронько С.П., Ткачев М.Ю., Ошовская Е.В. Гидравлическое моделирование процесса смены погружных стаканов на слябовых МНЛЗ // Электрометаллургия. 2016. № 10. С. 15–22.
18. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
19. Цаплин А.И., Никулин И.Л. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2011. – 299 с.
20. Провоторов Д.А. Системы автоматической замены стаканов-коллекторов на установках непрерывного литья заготовок // Матер. Междунар. конф. «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 138–141.
21. Еронько С.П., Ошовская Е.В., Ткачев М.Ю. Исследование и совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов промежуточного ковша слябовой МНЛЗ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 1. С. 49–56.

Поступила 3 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 7, pp. 520–526.

MODEL STUDIES OF HYDRODYNAMIC CHANGES OF STEEL FLOWS IN MOLD OF SLAB CCM DURING SUBMERGED NOZZLES REPLACEMENT

S.P. Eron'ko¹, V.I. Zolotukhin^{2,3}, M.Yu. Tkachev¹, D.A. Provotorov^{2,3}, E.V. Oshovskaya¹

¹ Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

² Tula State University, Tula, Russia

³ Scientific Industrial Enterprise "Vulkan-TM", Tula, Russia

Abstract. The analysis results of trends and modern techniques of research in the field of steel continuous casting are highlighted which are aimed at finding and eliminating of factors that have a negative impact on the

surface quality of continuous cast billets. It is shown that the existing concept of creating quick change systems of submerged nozzles, which are used on the slab CCM, leads to the formation at the each stream of machine during serial casting of 20 heates of substandard portion of the billet with 30–40 m of length, formed as a result of unstable hydrodynamic conditions in the mold. The research results are given for the physical model of changes of trajectory and speed of the metal flows into the CCM mold, which are related with submerged nozzles replacement in the process of serial casting of steel. Recommendations to reduce duration of the negative impact of this factor on the con-

ditions of cast billet formation are offered. Using control-measuring system with strain gauge transducer, it was found that the fluid flows velocity difference at the opposite narrow walls of the mold model, causing a violation of the thermal conditions of crust formation of continuous casting billet, in the case of once-through submerged nozzles can reach 2.0 – 2.3 and for non-pressure hollow-bottom nozzles with two lateral holes separated by divider – 1.2 – 4.0. Information about the trajectory symmetry breaking of circulation circuits of melt flows in the mold, caused by conducting of operation of outworn submerged nozzle replacing, also was obtained using high speed video materials. During the research the visualization of water flows trajectories, which simulated the molten steel in the mold model, was provided by introduction of air through a channel of model of stopper-monoblock of the tundish, so that the input of argon during casting was simulated. The obtained information allowed to develop a new principle of construction of system of submerged nozzles quick change which consists the combined and parallel implementation of individual stages of refractories replacement by its structural elements (manipulator, teeming and pushing devices). It allowed to reduce the time required to replace a outworn submerged nozzle and to increase the yield during the production of slab billets on CCM.

Keywords: continuous casting, submerged nozzle, mold, physical model, metal flows, duration of the nozzle replacing, manipulation system.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-520-526

REFERENCES

1. Kuklev A.V., Leites A.V. *Praktika nepreryvnoi razlivki stali* [Practice of steel continuous casting]. Moscow: Metallurgizdat, 2011, 432 p. (In Russ.).
2. Devyatov D.Kh., Logunova O.S., Tutarova V.D., Yachikov I.M. *Upravlenie kachestvom nepreryvnolitykh zagotovok* [Quality management of continuous cast billets]. Magnitogorsk: MGTU, 2006, 367 p. (In Russ.).
3. Efimov V.A., El'darkhanov A.S. *Tekhnologii sovremennoi metallurgii* [Technologies of modern metallurgy]. Moscow: Novye tekhnologii, 2004, 784 p. (In Russ.).
4. Smirnov A.N., Glazkov A.Ya., Pilyushenko V.L. *Teoriya i praktika nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Theory and practice of continuous casting]. Donetsk: DonGTU, 2000, 364 p. (In Russ.).
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Razvitie tekhnologii nepreryvnoi razlivki stali* [Development of steel continuous casting technology]. Moscow: ELIZ, 2002, 208 p. (In Russ.).
6. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Horizontal HCC-12000 unit for the continuous casting of semifinished products. *Metallurgist*. 2011, no. 55 (1-2), pp. 116–118.
7. Smirnov A.N., Efimova V.G., Verzilov A.P., Maksaeв E.N. Clogging of submersible nozzles in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 11, pp. 833–837.
8. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. *Metallurgist*. 2008, no. 52 (7-8), pp. 420–423.
9. Gornakov A.I. *Modelirovanie protsessа dvizheniya zhidkogo metalla v kristallizatore ustanovki nepreryvnogo lit'ya stali: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Simulation of movement process of the liquid metal in the CCM mold: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Komsomolsk-on-Amur: Institut mashinovedeniya i metallurgii DVO RAN, 2013, 128 p. (In Russ.).
10. Gushchin V.N. *Razrabotka sposobov tekhnologicheskogo vozdeystviya na formirovanie nepreryvnolitykh zagotovok i slitkov i oborudovaniya dlya ikh realizatsii s tsel'yu povysheniya kachestva metalla: Dis. ... dok. tekhn. nauk* [Development of methods of technological influence on the formation of continuously cast billets and ingots and equipment for its implementation in order to improve the quality of metal: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Nizhny Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2011, 356 p. (In Russ.).
11. Kollberg S.G., Khakl' Kh.R., Lekhman A.F., Erikson Ya.E. Traditional slabs casting using electromagnetic systems. *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 53–61. (In Russ.).
12. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. *Nepreryvnaya razlivka stali. Gidromekhanika mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Continuous casting. Hydromechanics of continuous casting machines]. Magnitogorsk: MGTU, 2014, 348 p. (In Russ.).
13. Eroshkin S.B., Bobylev G.S., Popovich V.N., Raiko V.A., Nitsl' G., Devis D. Application experience of submerged nozzles of "Foseco GmbH" company on the slab CCM of JSC "Severstal". *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 61–66. (In Russ.).
14. Eron'ko S.P., Bykovskikh S.V., Oshovskaya E.V. *Raschet i konstruirovaniye oborudovaniya dlya vnephechnoi obrabotki i razlivki stali* [Calculation and design of equipment for secondary metallurgy and casting]. Kiev: Tekhnika, 2007, 344 p. (In Russ.).
15. Gerasimenko V.G., Chaika D.V. Physical modeling of hydrodynamics of continuous casting. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010, no. 7, pp. 264–265. (In Russ.).
16. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. *Metallurgist*. 2011, no. 55 (3-4), pp. 163–166.
17. Eron'ko S.P., Tkachev M.Yu., Oshovskaya E.V. Hydraulic modeling of replacing process of the submerged nozzles on slab CCM. *Elektrometallurgiya*. 2016, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.).
18. Smirnov A.N., Kuberskii S.V., Shtepan E.V. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Donetsk: DonNTU, 2011, 482 p. (In Russ.).
19. Tsaplin A.I., Nikulin I.L. *Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov i ob'ektov v metallurgii* [Simulation of thermophysical processes and objects in metallurgy]. Perm: PGTU, 2011, 299 p. (In Russ.).
20. Provotorov D.A. Systems of automatic nozzles-collectors changing on CCM. In: *Mater. mezhdunar. konf. "Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya"* [Papers of Int. Conf. "Automation: problems, ideas, decisions"]. Tula: Izd-vo TulGU, 2006, pp. 138–141. (In Russ.).
21. Eron'ko S.P., Oshovskaya E.V., Tkachev M.Yu. Investigation and improvement of the rapid change system of submerged nozzle of slab CCM tundish. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 1, pp. 49–56. (In Russ.).

Information about the authors:

S.P. Eron'ko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants" (ersp@meta.ua)

V.I. Zolotukhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Welding, Casting and Technology of Structure Materials", General Director (info@vulkantm.com)

M.Yu. Tkachev, Assistant of the Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants"

D.A. Provotorov, Cand. Eng., Engineer of the Chair "Technological systems of the food, printing and packaging industries"

E.V. Oshovskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants"

Received April 3, 2017