

УДК 669.74.047

С. Н. Писарский, инженер

А. Н. Смирнов*, д-р техн. наук, проф., ведущ. науч. сотр.,
e-mail: stalevoz@i.ua

Д. В. Рябый**, аспирант

Standart Metallurgical Company, Лагос, Нигерия

* Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**Донбасский государственный технический университет, Лисичанск

ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА МНОГОРУЧЬВЫХ СОРТОВЫХ МНЛЗ

Стабильно компактный характер истечения открытой струи металла из промковша в кристаллизатор на сортовых машинах непрерывного литья заготовок является одним из условий достижения высоких показателей по серийности разливки, качеству заготовок, минимизации потерь металла и производственных затрат. В публикации представлены результаты промышленных исследований причин и факторов, влияющих на гидродинамику открытой струи, а также рекомендации по ее стабилизации. Показано, что скорость разливки является наиболее значимым фактором, влияющим на частоту возникновения случаев «веерения» струи. Поэтому для увеличения производительности сортовых МНЛЗ за счет максимально возможного повышения скорости разливки также необходима реализация представленных рекомендаций.

Ключевые слова: сортовая машина непрерывного литья заготовок, компактность открытой струи, поверхностные дефекты, аварийный прорыв, экзогенные неметаллические включения, турбулентные вихревые структуры, стаканы-дозаторы, автостарт, схема футеровки промковша.

В последнее десятилетие рынок длинномерной продукции развивается быстрее, чем когда-либо. При этом требования потребителей ужесточаются, как в отношении качества продукции, так и в отношении производительности новых и эксплуатируемых МНЛЗ. Однако возможности повышения эффективности производства традиционных сортовых МНЛЗ в основном уже достигли своих технологических пределов. Поэтому основным направлением развития технологии разливки на сортовых МНЛЗ является поиск таких технологических решений и приемов, оптимизация которых обеспечивает гарантированное получение бездефектных непрерывнолитых заготовок и максимальную производительность при снижении производственных затрат [1, 2].

Для повышения эффективности разливки стали на сортовых МНЛЗ открытой струей важно обеспечить стабилизацию не только скорости разливки [3], но и компактности истечения струи металла, поступающей из промковша в кристаллизатор.

Целью выполненных исследований была идентификация основных причин и факторов, вызывающих нарушение гидродинамики компакт компактного истечения струи металла на участке «промковш – кристаллизатор», которые приводят к образованию недопустимых дефектов заготовки и вынужденному прекращению разливки на «проблемном» ручье вследствие крайне высокой вероятности получения аварийного прорыва металла под кристаллизатором.

На современных сортах МНЛЗ использование устройств быстрой замены стаканов-дозаторов (рис. 1), обеспечивающих разливку длинными (40–60 плавков) и сверхдлинными (70–80 плавков и выше) сериями, является неперенным условием их эффективности [4].

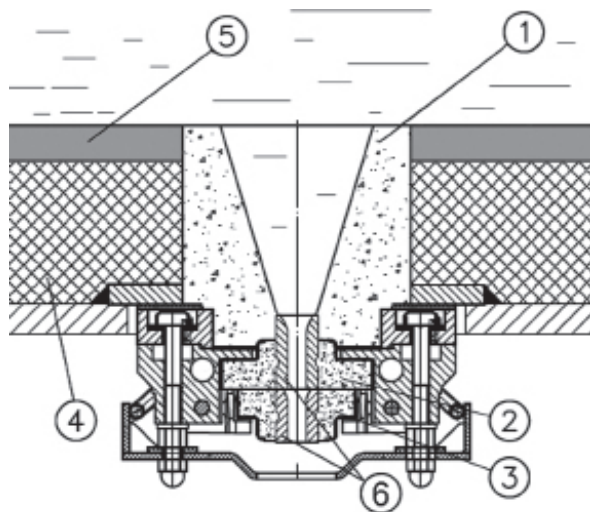


Рис. 1. Разливочный узел промковша сортовой МНЛЗ с системой CNC быстрой замены стаканов-дозаторов: 1 – воронка из набивной массы или формованный гнездовой блок; 2 – верхний стакан-дозатор типовой конструкции; 3 – нижний (сменный) стакан-дозатор; 4 – постоянная футеровка; 5 – рабочий (возобновляемый) слой футеровки; 6 – ZrO_2 – вставки в стаканах-дозаторах

«заворот корки», «заливина», являющиеся причиной аварийных прорывов металла под кристаллизатором [5, С. 43]. С уменьшением сечения заготовки и увеличением скорости разливки интенсивность нежелательных процессов на зеркале металла в кристаллизаторе и обусловленных ими дефектов заготовки возрастает.

Снижение технико-экономической эффективности производства сортовой МНЛЗ из-за нарушения компактного характера истечения открытой струи с учетом особенностей технологического процесса в общем случае обусловлены следующими факторами:

- потерями производства МНЛЗ из-за аварийных прорывов металла под кристаллизатором или вынужденных остановок ручьев различной продолжительности для их предотвращения;
- дополнительными потерями металла в виде брака заготовок по «поясам» и коротким (не соответствующих мерной длине по спецификации заказчика) заготовкам, образующихся из-за удаления «поясных» участков; дополнительной головной и хвостовой обрезки заготовок; дополнительных отходов металла в виде скрапа в аварийных емкостях;
- дополнительным расходом сменных стаканов-дозаторов («глухих», стартовых с уменьшенным диаметром отверстия и рабочих) при перезапусках ручьев МНЛЗ;
- дополнительным использованием расходных и огнеупорных материалов при переподготовке ручья;

Металлопроводящие каналы стаканов-дозаторов изготавливаются из обладающего высокой термостойкостью диоксида циркония ZrO_2 . На рис. 2, а показана компактная струя, поступающая из промковша в кристаллизатор, обеспечивающая минимальные волно- и брызгообразование на зеркале металла в нем. Под воздействием факторов, вызывающих гидродинамические возмущения в струе, наблюдаются отклонение ее от вертикали, деформации продольного и поперечного профиля вплоть до образования «веера» (рис. 2, б), интенсивное разбрызгивание металла. При этом в области зеркала металла в кристаллизаторе растет интенсивность волнообразования (рис. 2, в), что приводит к образованию наплесков и набрызгов стали на стенки кристаллизатора. В результате этого в поверхностном слое заготовки образуются дефекты типа

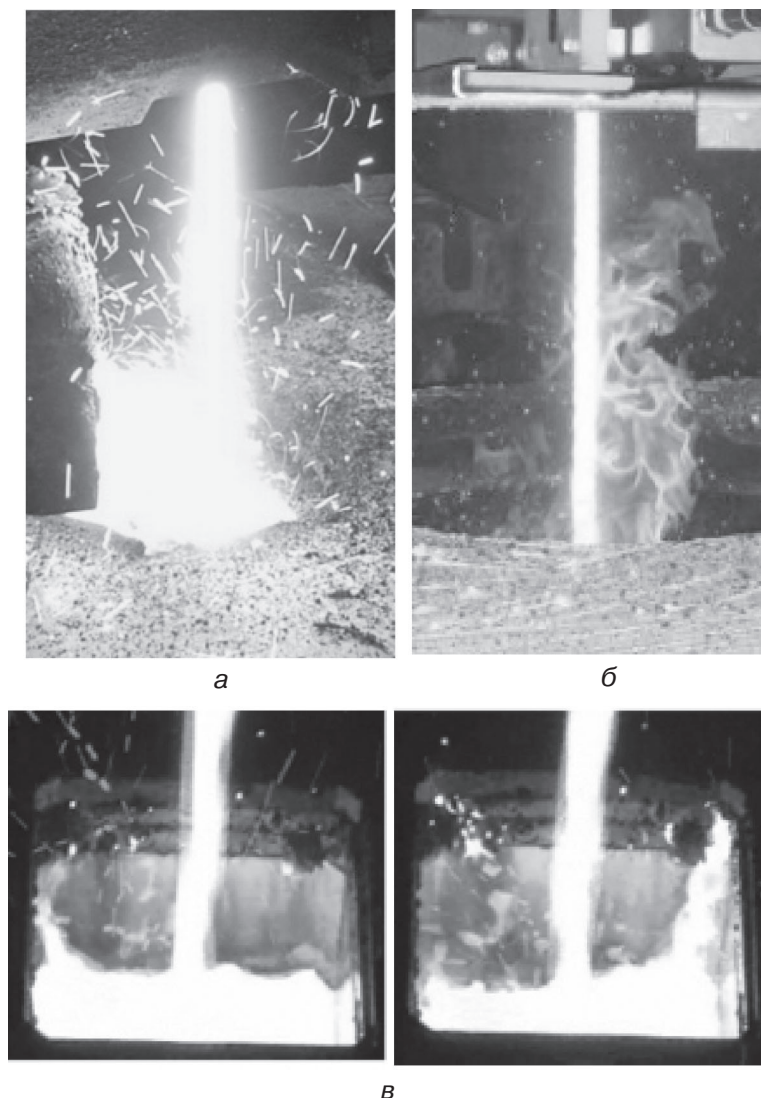


Рис. 2. Разливка на сортовых МНЛЗ открытой струей: а – компактная струя; б – «веерная» струя; в – наплески, брызго- и волнообразование на зеркале металла в кристаллизаторе

– повышением удельных затрат на медные гильзы кристаллизатора, что обусловлено увеличением скорости их износа и, соответственно, снижением их эксплуатационного ресурса (стойкости) при вытягивании остывших (после остановок разливки на ручье) заготовок, которые часто имеют искаженный профиль.

Кроме того, как показывает промышленная практика, после вынужденных прерываний разливки на ручье из-за «веерений» струи, в том числе кратковременных, вследствие ускоренного засорения форсунок системы вторичного охлаждения (ВО) нередко наблюдается нарушение ее нормальной работы. В результате возрастает вероятность получения заготовок с повышенной кривизной и ромбичностью, что также приводит к росту скорости износа гильз и дополнительным потерям металла в виде брака заготовок.

В зависимости от длительности остановки ручья на практике используются различные процедуры возобновления разливки на нем. При кратковременных (до 1 мин) остановках для возобновления разливки достаточно вновь восстановить подачу металла в кристаллизатор. При остановках продолжительностью до 10–15 мин (в зависимости от сечения заготовки) заготовка из ручья не выводится, но для последующего возобновления разливки в затвердевающую заготовку «вмораживается» специальная

сцепка. При остановках продолжительностью более 10–15 мин заготовка выводится из ручья, а затем производится полная переподготовка ручья с заведением затравки и выполнением подготовительных операций в кристаллизаторе.

Основными причинами нарушения компактного характера истечения струи для рассматриваемой технологии разливки являются: попадание в канал стаканов-дозаторов крупных экзогенных неметаллических включений из промковша, являющихся продуктами разрушения его футеровки или частицами покровного шлака; развитие в ванне промковша гидродинамических возмущений в виде вихревых структур различного масштаба, которые затем переносятся потоком металла в металлопроводящие каналы разливочных узлов промковша.

Поскольку в системе быстрой замены стаканов-дозаторов для предотвращения дестабилизации струи, обусловленного формированием зоны обратных течений и вихреобразованием в потоке за уступом, диаметр канала нижнего стакана-дозатора всегда выбирается меньше, чем у верхнего, то наиболее часто эти экзогенные неметаллические включения задерживаются в канале нижнего стакана-дозатора.

Для так называемых «стартовых вееров», наблюдаемых в начале разливки серии плавок, экзогенные неметаллические включения, обнаруживаемые в каналах стаканов-дозаторов, имеют вид относительно рыхлых, отслоившихся фрагментов футеровки промковша. Обычно это частицы рабочего торкрет-покрытия или набивной массы, используемой для формирования воронки над верхним стаканом-дозатором в разливочном узле промковша. Нередко эти фрагменты имеют в своем составе мелкие капли стали сфероидальной формы. По результатам химического анализа экзогенных включений установлено, что в них преобладают частицы MgO ($\approx 50\%$) и SiO_2 ($\approx 20\text{--}25\%$), что примерно соответствует соотношению этих фаз в используемых торкрет-массах разных производителей.

Локальному разрушению футеровки воронки разливочного узла, формируемой из набивной массы на основе Al_2O_3 , обычно предшествует использование кислорода для открытия ручьев. Установлено, что использование формованных огнеупоров (гнездового блока) для разливочного узла заметно снижает вероятность такого разрушения.

Достаточно часто причиной «веерения» струи после разливки 30–50 плавок является также попадание в канал нижнего стакана-дозатора фрагментов от разрушения калиброванной ZrO_2 -вставки верхнего стакана-дозатора (рис. 3). Разрушение ZrO_2 -вставки верхнего стакана-дозатора типовой конструкции начинается

с части, выступающей из массива формованного огнеупора, и, как правило, связано с использованием кислорода для открытия ручьев в начале разливки или при перезапусках ручьев по ходу серийной разливки.

При контакте с реакционной зоной взаимодействия струи кислорода с металлом, имеющей температуру 2200–2800 °С, огнеупоры подвергаются интенсивному термическому и физико-химическому воздействию. Возникающие в них значительные градиенты температур приводят к возникновению термических напряжений, которые могут превышать пределы прочности материала. При этом величина термических напряжений прямо пропорциональна коэффициенту термического расширения, а структура напряжений характер-

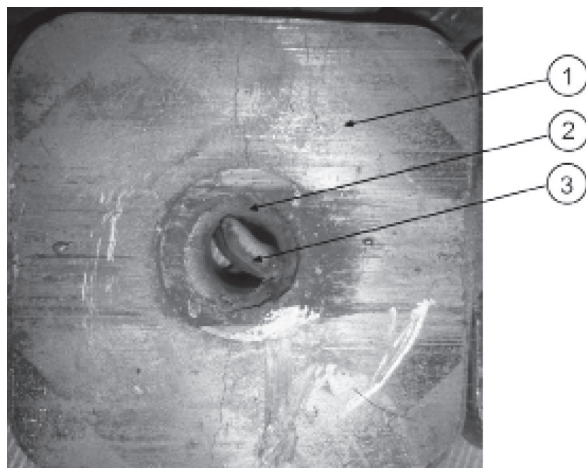


Рис. 3. Нижний (сменный) стакан-дозатор промковша с фрагментом разрушенной ZrO_2 -вставки от верхнего стакана-дозатора (1 – контактная поверхность скольжения нижнего стакана-дозатора; 2 – калиброванная ZrO_2 -вставка; 3 – фрагмент от разрушенной ZrO_2 -вставки верхнего стакана-дозатора)

изуется возникновением растягивающих напряжений во внешних слоях ZrO_2 -вставки. Зарождение трещин начинается в наружных слоях с последующим их распространением внутрь и приводит со временем к разрушению ZrO_2 -вставки.

Следует отметить, что по своим физическим свойствам даже стабилизированная оксидом иттрия Y_2O_3 кубическая фаза ZrO_2 , применяемая для изготовления ZrO_2 -вставок стаканов-дозаторов, является материалом, склонным к термическому растрескиванию из-за термоударов. Поэтому для предотвращения явления «веерения» струи из-за разрушения верхнего стакана-дозатора рекомендуется использование усиленной его конструкции, в котором ZrO_2 -вставка целиком расположена в массиве формованного огнеупора.

Следует также отметить, что огнеупоры на основе MgO из-за комплекса физических свойств (коэффициент термического расширения, теплопроводность, теплоемкость, модуль упругости) наиболее склонны к термическому растрескиванию. Причем при охлаждении эта склонность проявляется гораздо в большей степени, чем при нагреве. Так, если при нагреве разрушающий перепад температуры составляет в зависимости от скорости нагрева 410–540 °C, то для естественного охлаждения на воздухе он составляет всего 70 °C, что обуславливает интенсивное термическое скалывание огнеупора при остывании рабочего слоя промковша. Разогретая перед разливкой до 1100–1200 °C поверхность футеровки промковша при длительном отсутствии контакта с металлом быстро остывает до температуры менее 800 °C, что создает условия для ее растрескивания. Поэтому в начале разливки необходимо обеспечить максимально быстрое наполнение промковша до рабочего уровня (при полностью открытом шиберном затворе, но с его кратковременным прикрытием для проверки работоспособности затвора после наполнения промковша на $\approx 2/3$ объема).

Попадание покровного шлака в каналы стаканов-дозаторов оказывается наиболее вероятным по ходу разливки серии плавов в процессе замены сталеразливочных ковшей (перековшовках) при задержках в открытии новой плавки, что сопровождается снижением уровня металла в промковше. При попадании фрагментов футеровки или шлака на зеркале металла в промковше под струю металла из сталеразливочного ковша они вследствие динамического воздействия на них струи металла затягиваются потоками в ванну. При определенных условиях экзогенные НВ могут попасть в металлопроводящие каналы разливочных узлов, став причиной «веерения» струи металла из промковша в кристаллизатор. Затягивание экзогенных неметаллических включений, имеющих по сравнению с жидкой сталью более, чем в 2 раза, меньшую плотность, из ванны промковша в канал стаканов-дозаторов происходит при скорости их всплытия меньшей, чем скорость потока металла, в который они вовлечены.

Важным вопросом в рассматриваемой проблеме является предотвращение «веерения», обусловленных переносом турбулентных структур различного масштаба из ванны промковша в струю, поступающую в кристаллизатор. Заметное влияние на этот перенос оказывает схема футеровки промковша, включая конструкцию разливочных узлов, металлоприемника, использование различного рода перегородок и т. п. Наиболее благоприятствующей указанному переносу турбулентности является традиционная конструкция разливочного узла (см. рис. 1) с приемной воронкой.

Выполненные на одном из заводов Украины, где в промковшах сортовых МНЛЗ используется традиционная схема разливочного узла, статистические исследования* влияния различных факторов на частоту случаев «веерения» струи показали, что наиболее значимым фактором влияния на частоту «веерения» струи является скорость разливки. Объем выборки был ограничен периодом в один квартал и соответствовал объему производства двух шестиручьевых МНЛЗ на уровне 600 тыс. т заготовки.

В ходе выполненных исследований была установлена сильная и нелинейная зависимость частоты «веерения» от скорости разливки. Например, удельный

* в работе принимали участие А. Ю. Оробцев, А. В. Морозов и др.

показатель частоты случаев «веерений», определяемый как среднее количество таких случаев за период, отнесенное к количеству разлитых плавков, составил для МНЛЗ-2 со средней / максимальной скоростью разливки 3,36/4,00 м/мин – 0,051 «веер»/плавка, в то время как на МНЛЗ-1 с соответствующими скоростями 2,95/3,5 м/мин – 0,026 «веер»/плавка. Видно, что повышенная в 1,14 раза средняя скорость разливки на МНЛЗ-2 по сравнению с МНЛЗ-1 приводит к увеличению удельного показателя «веерений» на ней в 1,96 раза. Одним из возможных объяснений этого факта может, предположительно, быть то обстоятельство, что с ростом скорости разливки нелинейно (пропорциональна квадрату скорости потока) возрастает доля кинетической энергии струи металла из сталеразливочного ковша, которая затрачивается на генерирование турбулентности в объеме промковша.

Кроме скорости разливки в качестве возможных факторов влияния на гидродинамику струи, оценивалось влияние объема промковша (30 и 40 т), содержания углерода в разливаемой стали, серийности разливки, а также расположение ручья. Изучалось также частотное распределение случаев «веерений» струи по ходу разливки серии, плавки и по ручьям (рис. 4).

Установлено, что максимальное количество случаев нарушений компактного характера истечения струи приходится на начало разливки первой плавки в серии, что обусловлено фактором «стартовых вееров» (рис. 4, а). Распределение количества возникающих «вееров» по серии имеет монотонно убывающий характер, что, предположительно, обусловлено увеличением толщины спеченного слоя футеровки, снижающим вероятность ее эрозии.

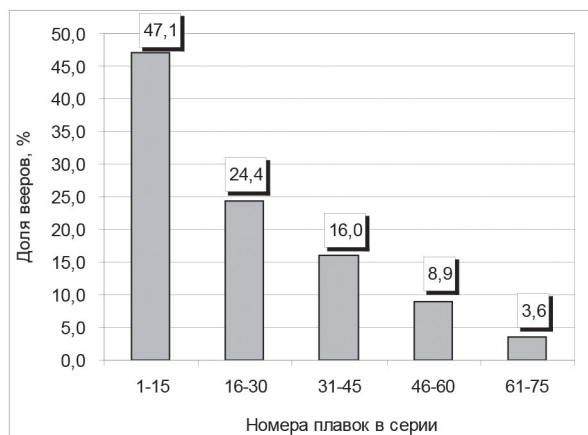
По ходу разливки плавки также наблюдается постепенное снижение случаев образования «вееров» (рис. 4, б). Это, очевидно, обусловлено тем, что для начала разливки каждой плавки серии характерна максимальная скорость истечения и кинетическая энергия струи металла из полного сталеразливочного ковша. При снижении уровня металла в нем кинетическая энергия струи и, соответственно, энергия, затрачиваемая на генерирование турбулентности в ванне промковша, уменьшаются, что приводит к снижению количества случаев «веерений» струи из промковша.

Показано, что локальный максимум «веерений» в середине разливки плавки (см. рис. 4, б) обусловлен проводимыми в этот период замерами температуры и отбором проб стали на химический анализ. Горение термоблоков и пробоотборников приводит хотя и к кратковременному, но интенсивному барботажу металла и турбулентному перемешиванию стали в месте их погружения, что способствует возникновению «веерений» струи.

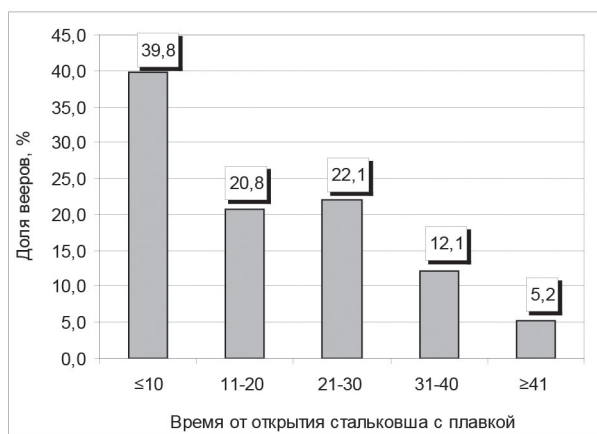
Повышенная частота случаев развития «веерений» струи по центральным ручьям (рис. 4, в) обусловлена их непосредственной близостью к металлоприемнику промковша, куда падает струя металла из сталеразливочного ковша, а более высокая частота случаев по крайним ручьям – усложнением структуры течения (наличие отраженных потоков и их закрутка) из-за близости торцевых стенок промковша.

Для снижения степени турбулизации ванны промковша от струи металла из сталеразливочного ковша конструктивно промковши сортовых МНЛЗ выполняются с металлоприемниками, в которые для гашения кинетической энергии струи устанавливаются так называемые «турбостопы». Они имеют различный объем и конфигурацию и адаптируются под конкретную конструкцию промковша и условия литья. Очевидно, что увеличение объема «турбостопа» оказывает положительное влияние на снижение вероятности «веерения» открытой струи сортовых МНЛЗ.

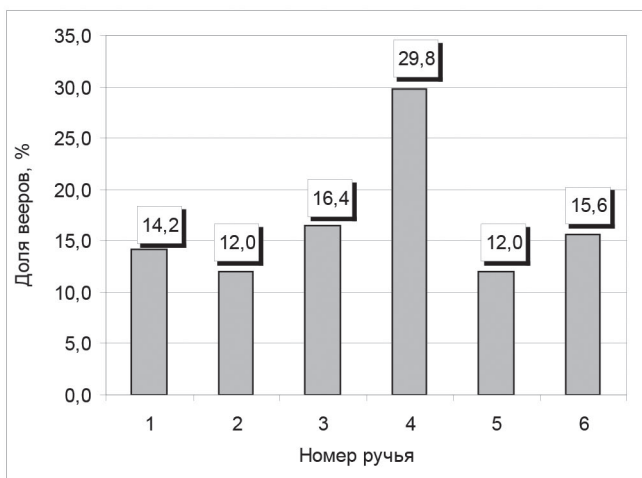
На одном из предприятий Украины, как вариант, была испытана и показала свою эффективность при серийности до 60–70 плавков схема футеровки с использованием специальных перегородок, формирующих приемный отсек, который отделяет область падения струи от остального объема промковша. Перегородки выполнялись из периклазового кирпича и имели разгрузочные отверстия (рис. 5). Такая схема может рассматриваться как эквивалентная схеме с использованием «турбостопа» предельно возможных размеров, которая позволяет в наибольшей степени обеспечить гидродинамическую однородность жидкой ванны промковша.



а



б



в

Рис. 4. Частотное распределение случаев «веерения»: а – по ходу разливки серии; б – по ходу разливки плавки; в – по ручьям

Для снижения «веерений» струи на одном из предприятий Украины в разливочных узлах промковша шестиручьевой МНЛЗ использовались стационарные трубы

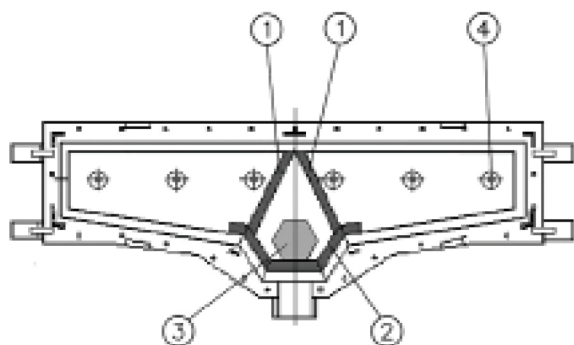


Рис. 5. Схема установки перегородок из периклазового кирпича в промежуточном ковше шестиручьевого сорта МНЛЗ: 1 – перегородки; 2 – защитная кладка (облицовка) металлоприемника; 3 – бойная плита; 4 – разливочный узел

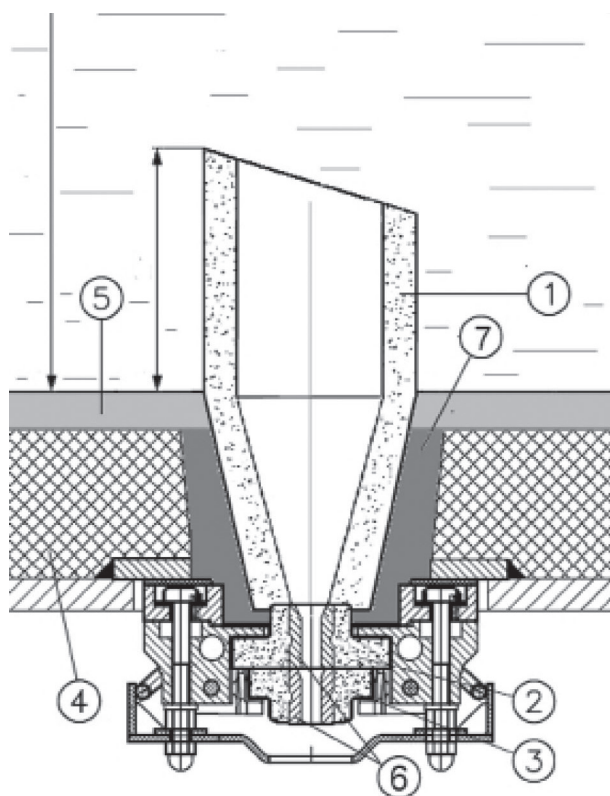


Рис. 6. Разливочный узел промковша сорта МНЛЗ с системой быстрой замены стаканов-дозаторов CNC и стационарной воронкой: 1 – стационарная воронка; 2 – верхний стакан-дозатор усиленной конструкции; 7 – ремонтная масса; остальные обозначения совпадают с обозначениями на рис. 1

алюмопериклазового состава (рис. 6). Эти трубы, также как и стартовые, обеспечивали автостарт ручьев на заданном уровне наполнения промковша, но, в отличие от последних, использовались в течение всей серийной разливки. В начале разливки серии в процессе наполнения промковша по достижении уровня металла в нем верхнего среза воронок, имеющих разную высоту h для пар центральных ($h_{3,4} = 170$ мм), средних ($h_{2,5} = 210$ мм) и крайних ($h_{1,6} = 250$ мм) ручьев, начиналось истечение металла сначала на средних, потом на центральных и, в последнюю очередь, на крайних ручьях. При этом струи металла из промковша до формирования компактного характера их истечения по всем ручьям удерживались разливщиками на отсечных поворотных желобах. Процесс стабилизации гидродинамики истечения заканчивался, как правило, по достижении уровня наполнения промковша металлом $H = 500-600$ мм. После этого за счет поочередного отведения желобов осуществлялся запуск ручьев.

Данная схема футеровки промковша обеспечивала, в первую очередь, снижение «стартовых вееров», что связано с заметным снижением использования кислорода на старте ручьев. Имело место также снижение количества случаев «веерения» струи по ходу разливки. Можно предположить, что в этом случае происходит «фильтрация» потока из промковша в кристаллизатор от крупномасштабных вихревых структур. Такой эффект может быть связан с известным [6, С. 43] в механике жидкости положением, являющимся следствием из второй теоремы Гельмгольца, о том, что вихревые трубки (шнуры) не могут заканчиваться внутри

жидкости – они либо образуют замкнутые кольца (торообразные вихри), либо опираются на стенки сосуда или свободные поверхности.

Вместе с тем, для использования этой схемы требуется учитывать многие факторы (емкость промковша, номинальную высоту уровня металла в нем, максимальную серийность разлива, возможность скачивания шлака из промковша и др.). Для исключения возможности затягивания шлака с зеркала металла в промковше в кристаллизаторы ужесточаются требования по уровню металла в нем. В частности, минимальное расстояние от верха наиболее высоких стационарных труб до зеркала металла в промковше в процессе перековки должно быть не менее $(H - h_{\max}) \geq (200-250)$ мм. Рекомендуется также для загущения шлака на зеркале металла в промковше выполнять присадку на него порошка на основе MgO (10–15 кг/плавку начиная со второй плавки серии).

Выводы

- Для достижения максимальной эффективности получивших в последнее десятилетие заметное распространение многоручьевых сортовых МНЛЗ, обеспечения их максимальной производительности, высокого качества поверхности заготовок, минимизации отходов и потерь металла необходимо обеспечить компактное истечение открытой струи металла из промковша в кристаллизатор, без возникновения случаев их разбрызгивания и «веерения». Поэтому исследования факторов и причин нарушения ее стабильного характера истечения представляют практический интерес.

- Основными причинами потери компактности открытой струи, вытекающей из стаканов-дозаторов промковша с диаметром канала (14–20) мм являются затягивание в них экзогенных неметаллических включений (продуктов разрушения футеровки промковша, ZrO_2 -вставки верхнего стакана-дозатора типовой конструкции системы CNC и ковшевого шлака), а также образование турбулентных вихревых структур, попадающих в стаканы из жидкой ванны промковша вследствие возникновения в ней по разным причинам гидродинамических возмущений.

- Распределение количества «вееров» по серии имеет монотонно убывающий характер, что обусловлено увеличением толщины спеченного слоя футеровки, снижающим вероятность ее эрозии. Распределение случаев возникновения «веерения» по ходу разлива плавки коррелируется с факторами гидродинамической природы – максимум веерения в начале разлива плавки обусловлен максимальной скоростью и кинетической энергией струи из полного сталеразливочного ковша, а локальный максимум «веерения» струи в середине плавки обусловлен кратковременным, но интенсивным барботажем и турбулентным перемешиванием стали в местах погружения термоблоков и пробоотборников. Распределение количества веерения по ручьям обусловлено особенностями развития и структурой потоков в ванне промковша.

- Скорость разлива является наиболее значимым фактором, влияющим на частоту возникновения случаев «веерения» струи. Этот факт, с учетом сильного и нелинейного характера этого влияния и существующей тенденции увеличения производительности сортовых МНЛЗ за счет максимально возможного повышения скорости разлива, диктует необходимость реализации комплекса мероприятий, направленных на стабилизацию гидродинамики истечения открытой струи. К ним относятся: строгое соблюдение режимов нагрева и эксплуатации футеровки промковша, использование формованных огнеупоров в разливочных узлах, применение верхних стаканов-дозаторов усиленной конструкции, совершенствование схемы футеровки промковша (турбостопы, перегородки, стационарные трубы в разливочных узлах и др.).

Список литературы

1. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкопытов и др. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417с.

2. Смирнов А. Н., Штепан Е. В., Касьян Г. И., Минц А. Я. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки стали на сортовых МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепр: Укрметаллургинформ, 2004. – № 8. – С. 140–143.
3. Оценка технологических возможностей стабилизации скорости разливки открытой струей на современной сортовой МНЛЗ. Сообщение 1 / С. Н. Писарский, А. Н. Смирнов, Д. А. Лавренко и др. // *Металл и литье Украины*. – Киев: ФТИМС, 2018. – № 3–4. – С. 22–27.
4. Оценка технологических возможностей стабилизации скорости разливки открытой струей на современной сортовой МНЛЗ. Сообщение 2 / С. Н. Писарский, А. Н. Смирнов, Д. А. Лавренко и др. // *Металл и литье Украины*. – Киев: ФТИМС, 2018. – № 5–6.
5. Совершенствование конструкции устройства для быстрой смены стаканов-дозаторов промковша МНЛЗ / С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, Д.А. Яковлев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепр: Укрметаллургинформ, 2006. – № 8. – С. 107–109.
6. Дефекты стали. Справ. изд. / Под ред. С. М. Новокщеновой, М. И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
7. Лойцянский Л. Г. *Механика жидкости и газа*. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

Поступила 02.07.2017

References

1. Smirnov, A., Kuberskii, S., Podkorytov, A. et al. (2012) *Nepreryvnaya razlivka sortovoy zagotovki Continuous casting of billets*. Donetsk: Tsifrovaya tipografiya, 417 p. [in Russian].
2. Smirnov, A.N., Shtepan Ye.V., Kas'yan G.I. et al. (2004). *Technological development of the high-speed steel casting parameters at billet*. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, issue 8, pp. 140–143 [in Russian].
3. Pisarskii, S.N. Smirnov, A.N. Lavrenko, D.A. et al. (2018) *Otsenka tekhnologicheskikh vozmozhnostey stabilizatsii skorosti razlivki otkrytoy struyey na sovremennoy sortovoy MNLZ. Soobshcheniye Estimation of technological possibilities of the speed stabilization of casting by open jet on modern billet CCM. Report 1. Metall i lit'ye Ukrainy [Metal and casting of Ukraine, issue 3–4, pp. 22–27 [in Russian].*
4. Pisarskii, S.N. Smirnov, A.N. Lavrenko, D.A. et al. (2018) *Estimation of technological possibilities of the speed stabilization of casting by open jet on modern billet CCM. Report 2. Metall: lit'ye Ukrainy, issue 5–6 [in Russian].*
5. Yeron'ko, S.P., Smirnov, A.N., Yakovlev D.A. et al. (2006) *Sovershenstvovaniye konstruktssii ustroystva dlya bystroy smeny stakanov-dozatorov promkovsha MNLZ [Improving the structure of the device for quick change of the CCM tundish nozzles]*. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, issue 8, pp. 107–109 [in Russian].
6. Novokshchenova, S.M., Vinograd, M.I. (Eds.). (1984) *Defects of steel*. Moscow: Metallurgiya, 199 p. [in Russian].
7. Loytsyanskiy, L. (1978) *Mechanics of fluid and gas*. Moscow: Nauka, 736 p. [in Russian].

Reseived 02.07.2018

С. М. Писарський, інженер

О. М. Смірнов*, д-р техн. наук, провідн. наук. співр., e-mail: stalevoz@i.ua

Д. В. Рябий **, аспірант

Standart Metallurgical Company, Ларос, Нігерія

*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

**Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ

ОЦІНКА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ФАКТОРІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА БАГАТОСТРУМЕНЕВИХ СОРТОВИХ МБЛЗ

Стабільно компактний характер витікання відкритого струменя металу з промковша в кристалізатор на сортових машинах безперервного лиття заготовок є однією з умов досягнення високих показників серійності розливання, якості заготовок, мінімізації втрат металу і виробничих витрат. У публікації представлені результати промислових досліджень причин і

факторів, що впливають на гідродинаміку відкритого струменя, а також рекомендації по його стабілізації. Показано, що швидкість розливання є найбільш вагомим чинником, що впливає на частоту виникнення випадків «віялування» струменя. Тому для збільшення продуктивності сортових машинах безперервного лиття заготовок за рахунок максимально можливого підвищення швидкості розливання також необхідна реалізація представлених рекомендацій.

Ключові слова: сортова машина безперервного лиття заготовок, компактність незахищеного струменя, поверхневі дефекти, аварійний прорив, екзогенні неметалеві включення, турбулентні вихрові структури, стакани-дозатори, автостарт, схема футерування промковша.

S. M. Pisarskii, Engineer

O. M. Smirnov*, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Leading Researcher,
e-mail: stalevoz@i.ua

D. V. Ryabiy **, postgraduate student

Standart Metallurgical Company, Lagos, Nigeria

*Physico-technological institute of metals and alloys, Kyiv

**Donbass State Technical University, Lisichansk

ESTIMATION OF HYDRODYNAMIC FACTORS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE STEEL CASTING AT THE MULTISTRAND BILLET CCM

Stably compact nature of the outflow of an open metal jet from the tundish to the mould at the billet CCM is one of the conditions for achieving high rates of casting seriality, the quality of billets, minimization of metal losses and production costs. The publication presents the results of industrial studies of causes and factors that affect the hydrodynamics of an open jet, as well as recommendations for its stabilization. It is shown that casting speed is the most significant factor affecting the frequency of occurrence of «harp» jet cases. Therefore, in order to increase the productivity of the billet CCM, due to the maximum possible increase in the casting speed, it is also necessary to implement the proposed recommendations.

Keywords: billet CCM, compactness of the open jet, the surface defects, the emergency breakout, exogenous nonmetallic inclusions, turbulent vortex structures, nozzles, autostart, tundish lining scheme.