

УДК 621.746.5.047

*к.т.н. Куберский С. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),  
Максаев Е. Н.  
(ПАО «АМК», г. Алчевск)*

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВОРОНКООБРАЗОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

*Проанализировано влияние условий подготовки металла к непрерывной разливке и основных параметров процесса на образование воронок при истечении металла из сталеразливочного и промежуточного ковшей, а также количество вовлекаемых в вихревые потоки неметаллических включений. Предложены рекомендации, способствующие повышению чистоты разливаемой стали по неметаллическим включениям и выхода годного, снижению вероятности образования дефектов, возникновения аварийных ситуаций и прорывов металла под кристаллизатором.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, истечение, ковши, вихревые потоки, воронка, цикл разливки, температура, остаток металла, дефекты, качество, выход годного.

Одним из основных источников загрязнения стали во время разливки на МНЛЗ является массоперенос неметаллических включений с покровного шлака сталеразливочного и промежуточного ковшей в кристаллизатор.

При опорожнении сталеразливочного ковша в процессе разливки плавки поток металла над разливочным отверстием постепенно приобретает вихревой характер и возможно вовлечение поверхностного шлака в металлопроводку. Поэтому в момент появления шлака в струе металла разливку из сталеразливочного ковша прекращают. На основании ранее проведенных исследований [1, 2] установлено, что вероятность возникновения аварийных ситуаций увеличивается в периоды окончания и начала разливки плавки из сталеразливочного ковша, а также значительно снижается качество непрерывнолитых слябов, полученных в эти периоды. Основной причиной такой ситуации является попадание ковшевого шлака в кристаллизатор, что вызывает изменение химического состава находящейся на его поверхности шлакообразующей смеси (ШОС) и, соответственно, ее свойств, а также негативно влияет на процесс формирования оболочки непрерывнолитой заготовки.

Важным показателем, влияющим на выход годной стали в технологической схеме получения непрерывнолитой заготовки, является обеспечение минимального остатка металла в используемых технологических емкостях по окончании процесса разливки плавки, который кантуется вместе со шлаком в чашу и используется в дальнейшем как скрап. Причем основным параметром, влияющим на массу ковшевого остатка, является высота уровня стали в ковше, при которой над разливочным отверстием образуется вихревая воронка. Следует отметить, что в практике разливки имеют место случаи появления шлака в струе, истекающей из сталеразливочного ковша даже при уровне металла в нем более 200 мм (более 10 т). Поэтому основной задачей данной работы было исследование параметров, влияющих на воронкообразование при истечении последних порций металла из технологических емкостей, для разработки рекомендаций, позволяющих осуществлять контроль и управление этим процессом.

Циркуляционные течения в жидкости, развивающиеся в устойчивые вихревые воронки, могут иметь различную природу. Начальное возбуждение самопроизвольного вращения в жидкости обусловлено действием силы Кориолиса и массодинамической

силы со стороны гравитационного поля Земли на радиальные потоки жидкости, движущиеся к месту истечения [3, 4]. По мнению авторов работ [5, 6], образование вихревых воронок можно связывать с проявлением неустойчивости симметричного ламинарного течения жидкости, асимметрией граничных условий и существованием вращения в жидкости перед истечением. Из указанных причин достаточно изученным можно считать влияние на воронкообразование сил Кориолиса [3, 4]. Условия для проведения опытных исследований этого влияния требовали, чтобы возмущения, возникающие в жидкости при заполнении емкости до открытия сливного отверстия, угасли до уровня меньшего, чем скорость вращения Земли для конкретного места, где проводится эксперимент. С этой целью при проведении экспериментов авторы работ [3, 4] выдерживали жидкость после заполнения емкости не менее 24 ч. Следовательно, если состояние покоя в объеме жидкости не достигается, то доминирующим фактором развития вихревых потоков над разливочным отверстием можно считать различные энергетические процессы, происходящие внутри объема жидкости, в том числе вызванные внешними воздействиями или их последствиями. Простые опыты переливания жидкости из одной емкости в другую, а также принудительного раскручивания потоков жидкости в емкости подтверждают, что после прекращения внешнего воздействия наблюдается продолжение циркуляционного вращения потоков.

В производственном процессе от сталеплавильного агрегата до разливки стали практически все технологические переливы, а также перемешивание расплава инертным газом способствуют возникновению различных потоков в объеме жидкого металла, обладающих определенным уровнем кинетической энергии. Не менее значимыми при этом являются различные физико-химические процессы, происходящие в жидкой ванне ковша, также способствующие возникновению конвективных потоков различной интенсивности.

В производственных условиях ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») были исследованы причины и характер воронкообразования в сталеразливочном ковше при разливке стали на слябовых МНЛЗ.

Процесс образования устойчивой воронки имеет нестихийный характер и частички шлаковых включений, вовлекаемые вихревым потоком, проникают в разливочное отверстие задолго до возможного визуального определения их в струе металла. Вращающимся потокам в жидкости сопутствует явление центрифугирования, при котором более легкие включения стремятся к центру ядра вращения и, коагулируя, образуют шлейф над эпицентром вращения. При образовании и развитии вихревых потоков над сталеразливочным отверстием постепенно увеличивается разряжение в центре ядра вращения. Когда выталкивающая сила, действующая на включения, оказывается ниже сил вихревого течения, то шлейф неметаллических включений направляется в металлопроводку по конической трубе низкого давления внутри вихревого потока. На поверхности вращения металлического расплава образуется вогнутый конус, объем которого заполняет поверхностный шлак. По мере развития вихревого потока вершина обратного конуса постепенно погружается в металлический расплав в направлении разливочного отверстия. В конечном итоге образуется труба (или прорыв) вихревой воронки, внутри которой по спиральной траектории перемещается шлак. Соответственно, после окончания разливки каждой плавки в серии значительная порция печного шлака неизбежно попадает в промежуточный ковш и далее, при определенных обстоятельствах, в кристаллизатор.

Для определения взаимосвязи между интенсивностью гидродинамических процессов и массопереносом шлаковых включений из сталеразливочного ковша в промежуточный было исследовано влияние некоторых параметров технологии получения непрерывнолитых слябов на количе-

ство накопленного в промежуточном ковше печного шлака за серию плавов.

Номенклатура разливаемых на «АМК» сталей подразделяется на группы в зависимости от химического состава. Каждой группе соответствуют оптимальные условия температуры и скорости разливки (табл. 1), которые определяют термодинамическое состояние объемов разливаемого металла.

Значение перегрева стали в сталеразливочном ковше, согласно технологическим условиям, составляет (30-35) °С над температурой в промежуточном ковше.

Для снижения процесса вторичного окисления и теплоизоляции поверхности металла в промежуточном ковше используются специальные смеси. Жидкую часть шлакового покрова в промежуточном ковше в начале разливки первой плавки в серии обеспечивает рафинирующая шлакообразующая смесь (ШОС), которая присаживается на поверхность металла в количестве 200 кг при наполнении ковша, а сверху на сформировавшийся шлаковый расплав подается теплоизолирующая смесь (ТИС) в таком же количестве. На следующих плавках серии ТИС добавляется в среднем по 70 кг.

Для анализа были выбраны серии из десяти плавов, разлитые в приблизительно одинаковых температурно-скоростных ус-

ловиях по каждой группе марок сталей. В связи с тем, что в производственном задании ПАО «АМК» имеют место частые изменения ширины и толщины слябов, наиболее приемлемыми показателями интенсивности истечения металла через разливочное отверстие сталеразливочного ковша емкостью 300 т являются массовый расход стали или цикл разливки плавки. Толщину жидкого шлака в промежуточном ковше определяли с помощью «намораживания» шлака на кислородной трубке, вертикально погруженной в расплав на 150-200 мм в районе стопора-моноблока с последующей выдержкой в течение 30-40 с (рис.).



Рисунок Фото фрагмента кислородной трубки после погружения в расплав для определения толщины шлакового расплава в промежуточном ковше

Таблица 1

Основные технологические параметры непрерывной разливки различных групп марок сталей на МНЛЗ ПАО «АМК»

Группы марок сталей	Скорость разливки* (м/мин) для толщины сляба (мм)				Перегрев стали* в промежуточном ковше, °С
	200	220	250	300	
LowC (низкоуглеродистые низкокремнистые типа 1006)	<u>1,5</u> 1,9	<u>1,3</u> 1,6	<u>1,1</u> 1,4	<u>0,6</u> 0,8	<u>25</u> 35
Peri (перитектические низкокремнистые типа St-37-2)	<u>1,2</u>	<u>1,1</u>	<u>1,0</u>	<u>0,6</u>	<u>20</u>
APeri (перитектические легированные типа 09Г2С)	1,6	1,45	1,3	0,8	30
MedC (среднеуглеродистые типа ЗСП)	<u>1,2</u> 1,6	<u>1,1</u> 1,45	<u>0,9</u> 1,2	<u>0,6</u> 0,8	<u>20</u> 30

\* – числитель min, знаменатель max значения.

Определение начального значения толщины жидкого шлака, образующегося на поверхности металла в промежуточном ковше после расплавления ШОС, производили при разливке около 150 т металла; при этом уровень металла над верхним срезом стаканов-дозаторов – ~1 м (масса стали в промежуточном ковше равна 50-55 т). Результаты нескольких замеров показали незначительные колебания толщины жидкого шлака при среднем ее значении 6 мм, что и было принято за базовое значение для всех контролируемых опытных серий плавов. Замеры толщины шлака, накопленного в

промежуточном ковше в течение всей серии, производили после прекращения разливки последнего сталеразливочного ковша при уровне металла в промежуточном ковше также около 55 т.

Средние значения длительности цикла разливки плавки в серии, расхода стали из сталеразливочного ковша и ее температуры, а также толщины шлакового расплава в промежуточном ковше и количества остающегося металлического остатка в сталеразливочном ковше, полученные на основании анализа более ста серий плавов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения параметров исследованных опытных плавов

Группы марок сталей	Цикл разливки, мин	Расход стали, т/мин	Толщина шлакового расплава, мм	Температура металла °С	Количество остающегося металла, т
Низкоуглеродистые (типа 1006)	40	7,5	80	1586	2,5
	50	6	73	1588	2
	60	5	62	1590	2
Перитектические низкокремнистые (типа St-37-2)	50	6	71	1570	2
	60	5	50	1574	1,5
Перитектические легированные (типа 09Г2С)	50	6	58	1564	1,5
	60	5	40	1566	1
Среднеуглеродистые типа ЗСП	50	6	60	1563	1,5
	60	5	40	1564	1

Несмотря на некоторые отличия физико-химических свойств шлакового расплава для различных групп марок стали, можно сделать вывод о явном влиянии скорости и температуры разливки на количество попадающего в промежуточный ковш печного шлака. Причем, чем меньше цикл разливки плавки и выше температура металла, тем больше печного шлака может проникать в промежуточный ковш и, соответственно, в кристаллизатор. Также следует отметить значительное увеличение толщины шлака

для перитектических низкокремнистых марок в сравнении с легированными. Для низкокремнистых марок сталей, раскисленных алюминием, характерно зарастание дозирующих устройств вследствие отложения на рабочей поверхности металлопроводящих огнеупорных материалов оксидов алюминия, что указывает на высокое содержание этих включений в стали и может приводить к прекращению разливки. Кроме того, неметаллические включения в жидкой стали различного происхождения неравно-

мерно распределяются в объеме расплава. Под действием Архимедовых сил включения стремятся к всплыванию, поэтому концентрация их в жидкой ванне увеличивается от нижних уровней к верхним. Неметаллические включения, энергия всплывания которых не позволяет переместиться через поверхность контакта металл-шлак, образуют в подповерхностной зоне слой шлакометаллической эмульсии [2]. Поэтому окончание разливки плавки низкремнистых марок часто сопровождается значительным снижением пропускной способности разливочного отверстия из сталеразливочного ковша, а также дозирующих устройств промежуточного ковша. Количество срабатываний аварийных сигналов, определяемых системой раннего обнаружения прорывов «Mold Expert», при разливке низкремнистых марок сталей, особенно St-37-2, значительно увеличивается и приходится в основном на период окончания разливки из сталеразливочного ковша и при открытии очередной плавки в серии [1].

Следует отметить, что короткие циклы разливки обусловлены сокращением цикла внепечной подготовки плавки на агрегате ковш-печь (АКП). При этом применяются более интенсивные процессы нагрева и перемешивания расплава инертным газом, значительно сокращаются интервалы времени между окончанием подготовки плавки на АКП и началом разливки на МНЛЗ. Иногда в производственных условиях вынужденно сокращается время «мягкого режима» продувки аргоном в конце подготовки плавки на АКП. Все указанные факторы приводят к более сильным инерционным последствиям динамического состояния объема металла перед разливкой и существенно влияют на выход годного непрерывнолитого металла, обусловленного в первую очередь остатком стали в сталеразливочном ковше.

Поэтому для исследуемого массива плавки было проанализировано влияние длительности цикла разливки плавки в серии и температуры стали в сталеразливоч-

ном ковше на количество остающегося в нем металла (табл. 2). Количество металлического остатка, кантуемого в чашу вместе со шлаком, после окончания разливки определялось визуально.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что существенное увеличение количества металлического остатка имеет место для плавки с наиболее высокой температурой, короткими циклами разливки и, соответственно, ограниченным временем внепечной обработки. Количество металла, кантуемого в чашу, можно считать косвенным показателем образования вихревой воронки при окончании разливки плавки из сталеразливочного ковша.

Для уменьшения количества шлакометаллического остатка, кантуемого в чашу, и с целью снижения массы остающегося в сталеразливочном ковше металла, при котором образуются вихревые воронки в конце процесса непрерывной разливки, в условиях ПАО «АМК» были разработаны и внедрены специальные технологические мероприятия, предусматривающие:

- изменение конструкции футеровки днища сталеразливочного ковша [7, 8], что обеспечивает уменьшение массы остающегося в нем металла и площади взаимодействия его со шлаком при достаточном для предотвращения воронкообразования уровне столба расплава в районе дозирующих устройств;

- максимальный расход металла для наполнения промежуточного ковша при остатке его в сталеразливочном в количестве 4-5 т, а перелив последних 1-2 т стали осуществляется дискретно, с использованием дросселирования струи шибберным затвором для подавления развития вихревых потоков и уменьшения уровня остаточного металла, при котором образуется воронка.

Рассматривая процесс перемещения шлаковых включений в кристаллизатор при смене сталеразливочного ковша (перековшовка), необходимо учитывать гидродинамические изменения потоков в промежу-

точном ковше не только на этапе окончания разливки, но и при открытии новой плавки. Начало разливки из сталеразливочного ковша следующей плавки в серии характеризуется максимальным напором струи металла, истекающей в промежуточный ковш, которая при падении пробивает слой шлака и вовлекает его вглубь ванны. При этом образуются интенсивные потоки, обладающие высокой кинетической энергией, что способствует дальнейшей транспортировке включений в направлении стаканов-дозаторов. Основными факторами, влияющими на интенсивность процесса транспортировки включений через ванну промежуточного ковша, является уровень металла в нем и массовый расход стали через дозирующие устройства. Попадание порций печного шлака и шлака промежуточного ковша в кристаллизатор значительно искажает рабочие физико-химические свойства находящейся на его поверхности ШОС, а также увеличивает гетерогенность минералогического состава гарниссажа, образующегося между медными плитами и формирующейся оболочкой слитка [1].

Окончание разливки из промежуточного ковша также регламентируется шлакометаллическим остатком (в условиях ПАО «АМК» 15 т), который исключает возможность попадания шлака из промежуточного ковша в кристаллизатор. Поэтому технология VAI (производитель МНЛЗ ПАО «АМК») не гарантирует удовлетворительного качества пяти последних метров хвостовой части непрерывнолитой заготовки в виду возможности образования в этом объеме газовых пузырей, осевой ликвации, пористости, неметаллических включений и других дефектов. Подробное изучение природы дефектообразования в хвостовой части слитка позволило выявить некоторые особенности этого процесса.

Окончание разливки серии сопровождается значительными потерями температуры расплава, что может привести к замерзанию разливаемой стали в дозирующих устройствах промежуточного ковша. Соответственно, это приводит к значительному

увеличению шлакометаллического остатка в промежуточном ковше и снижению выхода годного сляба, особенно при разливке сталей с узким интервалом кристаллизации (высокоуглеродистых). Поэтому по существующей технологии окончание разливки предусматривало максимально быстрое опорожнение промежуточного ковша до массы металла в нем 15 т. При этом не было учтено, что в момент прекращения разливки длина жидкой фазы непрерывнолитой заготовки имеет максимальное значение. После прекращения подпитки слитка жидкой сталью и замораживания хвостовой части условия кристаллизации резко изменяются, способствуя развитию ликвационных процессов, ухудшению удаления газов, хаотичному распределению неметаллических включений в объеме кристаллизующейся хвостовой части, а усадочные явления способствуют при этом неконтролируемому развитию пористости и образованию мелких раковин. Зачастую глубина проникновения перечисленных видов дефектов превышала пять метров хвостовой части непрерывнолитой заготовки и приводила к браку более 30 т стали за серию.

На основании полученных при исследовании отмеченных процессов данных базовая технология была пересмотрена и вместо резкого прекращения разливки предложено плавное снижение ее скорости на заключительной стадии опорожнения промежуточного ковша по определенному алгоритму, что позволяет решать существующую проблему в двух направлениях:

- снизить ликвационные и усадочные дефекты за счет плавного перемещения конуса кристаллизации хвостовой части непрерывнолитой заготовки снизу вверх;
- избежать развития интенсивного вихревого потока при снижении уровня в промежуточном ковше и исключить попадание шлака в кристаллизатор при уровне металла в нем менее 10 т за счет плавного, в соответствии со скоростью разливки, сокращения сечения сталеразливочного канала стакана-дозатора стопорным механизмом.

Для предотвращения чрезмерного охлаждения металла на заключительном этапе разливки последней плавки в серии с плавным снижением скорости и, следовательно, более продолжительным циклом был увеличен расход ТИС для сталеразливочного и промежуточного ковшей. Кроме того, для обеспечения необходимой температуры стального мениска в кристаллизаторе, позволяющей поддерживать его в жидком состоянии для удаления газов и неметаллических включений, подача ШОС должна производиться практически до конца разливки и заканчиваться за 0,5 м до окончания формирования хвостовой части. В результате внедрения предложенных технологических мероприятий был значительно снижен брак хвостовой части непрерывнолитой заготовки, а длина технологической обрезки уменьшилась до 1 м.

Таким образом, в настоящей работе:

– исследованы основные причины, влияющие на процесс образования вихревых потоков над разливочными отверстиями сталеразливочного и промежуточного ковшей;

– установлено, что при меньшей длительности цикла разливки плавки и более высокой температуре стали количество шлака, проникающего с зеркала металла сталеразливочного и промежуточного ковшей в кристаллизатор, увеличивается вследствие возникновения вихревых потоков и образования воронок при истечении последних порций металла из технологических емкостей;

– предложены рекомендации, позволяющие повысить качество получаемых слябов, а также увеличить выход годной стали за счет снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций и прорывов металла, пораженности непрерывнолитой заготовки различными дефектами и уменьшения количества шлакометаллических остатков в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

В ходе последующих исследований предполагается разработать алгоритмы плавного снижения скорости непрерывной разливки на заключительной стадии процесса для различных типоразмеров получаемых слябов.

### Библиографический список

1. Смирнов, А. Н. Некоторые аспекты возникновения прилипания и прорывов корочки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. Н. Максаев. — М. : Электрометаллургия, 2013. — № 9. — С. 13–21.
2. Смирнов, А. Н. Влияние неметаллических включений на подвисяние и прорыв оболочки непрерывнолитого слитка в кристаллизаторе МНЛЗ [Текст] / А. Н. Смирнов, Е. Н. Максаев, С. В. Куберский, В. Г. Ефремова // Процессы литья. — 2015. — № 4. — С. 22–30.
3. Faber T.E. *Fluid Dynamics for Physicists* [Текст] / Cambridge: Univ. Press, 1995. 440 p.
4. Trefelhen L.M., Ringer R.W., Fink P.T. et al. The Bath-tub vortex in the southern hemisphere [Текст] / *Nature*. 1965. V 207. №5001. P.1084–1085.
5. Зуйков, А. Л. Поверхностные вихревые воронки в тяжелых жидкостях [Текст] / А. Л. Зуйков // ГОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — М. : МГСУ, 2011. — 72 с.
6. Павельев, А. А. Эксперимент по формированию вихря при вытекании жидкости из бака [Текст] / А. А. Павельев, А. А. Штарев // Изв. РАН. МЖГ. — 2001. — № 5. — С. 203–207.
7. Пат. № 81840 Україна, МПК В 22 D 41/02 Сталерозливний ківш / О.М. Смірнов, Є.М. Максаєв, А.В. Головчанський, С.В. Куберський, М.Б. Левіт, І.М. Салмаш; заявник та патенто власник ДонДТУ. — № и201301332; заяв. 04.02.2013; опубл. 10.07.2013 р., Бюл. № 13. — 4 с.
8. Куберский, С. В. Усовершенствование конструкции футеровки днища сталеразливочного ковша для повышения качества и выхода годной непрерывнолитой стали [Текст] / С. В. Куберский, Е. Н. Максаев, С. В. Семирягин, А. В. Головчанский // Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях : Сб. научн. тр. — Донецк : «НОУЛИДЖ», 2013. — С. 9–104.

© Куберский С. В.

© Максаев Е. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,  
зам. нач. ЦЛК ПАО «АМК» Тарасовым В. Н.*

*Статья поступила в редакцию 08.11.16.*

**к.т.н. Куберський С. В.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), **Максаєв Є. М.** (ПАТ «АМК», м. Алчевськ)

### **ВПЛИВ ЕФЕКТУ ВОРОНКОУТВОРЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ**

*Проаналізовано вплив умов підготовки металу до безперервного розливання і основних параметрів процесу на утворення воронки під час витікання металу з сталерозливального і проміжного ковшів, а також кількість захоплених вихровими потоками неметалічних включень. Запропоновано рекомендації, які сприяють підвищенню чистоти розливої сталі за неметалічними включеннями і виходу придатного, зниженню ймовірності утворення дефектів, виникнення аварійних ситуацій і проривів металу під кристалізатором.*

**Ключові слова:** *безперервне розливання, витікання, ківш, вихрові потоки, воронка, цикл розливання, температура, залишок металу, дефекти, якість, вихід придатного.*

**PhD Kuberskiy S. V.** (DonSTU, Alchevsk, LPR), **Maksaiev Ye. N.** (PJSC « Alchevsk Iron-and-Steel works », Alchevsk)

### **INFLUENCE OF VORTEX FORMATION EFFECT ON PARAMETERS OF CONTINUOUS CASTING PROCESS**

*Influence of conditions of metal preparing to continuous casting has been analyzed along with the main process parameters on vortex formation at metal flowing from casting ladle and tundish ladle as well as the quantity of involved in whirling flows the nonmetallic inclusions. Guidelines have been proposed for increasing the purity of casting steel concerning nonmetallic inclusions and prime yield, reducing the possibility of defects occurring, emergency occurrence and metal penetration under the crystallizer.*

**Key words:** *continuous casting, flowing, ladle, whirling flows, vortex, casting cycle, temperature, hot heel, defects, quality, prime yield.*