

А. Н. Смирнов, С. В. Куберский*, Е. Н. Максаев**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Донецкий национальный технический университет, Красноармейск

**Донбасский государственный технический университет, Лисичанск

Изменение эксплуатационных свойств шлакообразующих смесей при серийной разливке и их влияние на ход процесса непрерывного литья

Проанализированы причины увеличения толщины слоя жидкого шлака в кристаллизаторе и влияние его на возникающие при вытягивании заготовки силы трения, теплоотвод, вероятность образования подвисаний и прорывов оболочки непрерывнолитого слитка.

Ключевые слова: печной шлак, воронкообразование, кристаллизатор, шлаковый расплав, ассимиляция, шлаковый гарниссаж, фазовый состав, структура, гетерогенность, инфильтрация, теплоотвод, трение, подвисание, прорыв

Высокий уровень технологических возможностей и программного обеспечения современных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) позволил существенно снизить аварийность процесса непрерывной разливки. Однако достаточно актуальной в настоящее время остаётся проблема подвисания корочки непрерывнолитой заготовки и её прорывы на выходе из кристаллизатора. Большая часть прорывов, не связанных с прямым нарушением технологии и состоянием оборудования МНЛЗ, относится к так называемым «шлаковым» прорывам [1]. Многие дефекты непрерывнолитых заготовок, особенно трещинообразование и поверхностные неметаллические включения, прямо или косвенно связаны с условиями теплопередачи и физическими свойствами смазки, поступающей в зазор между стенками кристаллизатора и заготовкой.

Для обеспечения безаварийного процесса непрерывной разливки особое внимание необходимо уделять шлакообразующим смесям (ШОС), используемым в кристаллизаторе, которые должны способствовать эффективному отводу тепла от кристаллизующегося металла и минимальному трению заготовки о стенки кристаллизатора для конкретных температурно-скоростных характеристик, свойственных определённым маркам сталей. Выбор эффективных ШОС осуществляется для каждого конкретного предприятия и зависит от технологии разливки и технических возможностей МНЛЗ, а также от технологии внепечной подготовки металла к непрерывной разливке. При этом основное внимание уделяется исходному составу ШОС, а не «искажённой» композиции жидкого шлака, образующегося на поверхности мениска в кристаллизаторе после взаимодействия его с разливаемой сталью, а также в результате перехода в него оксидов из разрушающейся огнеупорной проводки, шлаков сталеразливочного и промежуточного ковшей, попадающих в кристаллизатор при технологических переливах в начале разливки и при перековшовках.

На протяжении разливки серии плавов одной и той же марки стали часто наблюдается постепенное увеличение (иногда просто непостоянство) толщины жидкого шлака в кристаллизаторе, сопровождаемое изменением характеристик трения, натяжения и теплоотвода в кристаллизаторе при том, что параметры разливки (температура, скорость) и расход ШОС на тонну стали остаются постоянными. Очевидно, что физико-химические свойства базовой ШОС и её химический состав при этом изменяются за счёт насыщения шлака в кристаллизаторе различными неметаллическими включениями, среди которых можно выделить эндогенные продукты реакций раскисления и десульфурации стали, а также экзогенные включения, попадающие в кристаллизатор из ковшевого шлака и при эрозии огнеупорных материалов [2].

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 сталеразливочным стаканом постепенно приобретает вихревой характер, что в конечном итоге приводит к образованию вихревой воронки и вовлечению поверхностного шлака в металлопроводку. Разливку из сталеразливочного ковша прекращают в момент появления шлака в струе металла, который определяется, как правило, визуально. В работах [3, 4] на основании проведённых исследований представлены данные, свидетельствующие о взаимосвязи снижения качественных показателей слэбов и увеличении аварийности процесса непрерывной разливки в периоды окончания и начала процесса перелива металла из сталеразливочного ковша. Причиной данного явления может быть изменение химического состава и свойств жидкой ШОС с точки зрения теплоотвода и смазки в результате проникновения шлаковых включений в кристаллизатор, что вызывает

нарушение процесса формирования оболочки непрерывнолитой заготовки.

В производственных условиях конвертерного цеха при разливке стали на двухручьевых слябовых МНЛЗ выполнены исследования с целью оценки параметров, влияющих на процесс воронкообразования и количество ковшового

шлака, попадающего в промежуточный ковш. Учитывая, что процесс образования устойчивой воронки в большинстве случаев имеет не стихийный характер развития, то частички шлаковых включений, вовлекаемые вихревым потоком, проникают в разливочное отверстие задолго до возможного визуального определения их в струе металла. Соответственно, значительная порция печного шлака неизбежно попадает в промежуточный ковш после окончания каждой плавки в серии.

Исследование влияния скорости и температуры разливки на количество проникающего в промковш печного шлака позволило установить, что чем меньше цикл разливки плавки и выше температура металла, тем больше печного шлака проникает в промковш, и, соответственно, в кристаллизатор. Эти данные подтверждает статистика аварийных ситуаций, фиксируемых системой раннего обнаружения прорывов «Mold Expert». Количество срабатываний аварийных сигналов при разливке низкоуглеродистых марок сталей по сравнению с остальными группами увеличивается в несколько раз.

Следует отметить, что короткие циклы разливки ограничивают циклы внепечной подготовки плавки на установке ковш-печь (УКП). При этом применяются более интенсивные процессы нагрева и перемешивания расплава инертным газом, значительно сокращаются интервалы времени между окончанием подготовки плавки на УКП и началом разливки на МНЛЗ. Иногда в подобных производственных условиях вынужденно сокращается время «мягкого режима» продувки в конце подготовки плавки на УКП, которое, согласно технологическим условиям, должно составлять не менее 5 минут. Все указанные факторы приводят к более сильным инерционным последствиям динамического состояния объёма металла перед разливкой, обусловленных существованием значительных конвективных потоков, влияющих на последующий процесс воронкообразования, а именно высоту остаточного столба металла, при котором образуется вихревая воронка, вовлекающая покровный шлак в металлопроводку. Для определения качественного показателя влияния на разливку предполагаемых инерционных процессов после подготовки плавки на УКП было проанализировано более ста плавки среднеуглеродистых марок сталей с различными условиями подготовки на УКП и количеством (по визуальной оценке) металлического остатка, кантуемого в чашу вместе со шлаком, после их разливки (табл. 1).

Существенное отличие в данных исследованиях по количеству металлического остатка в сторону увеличения отмечается для плавки с наиболее короткими

Количество металлического остатка после разливки плавки, отличающихся условиями подготовки их к разливке

Среднее количество металла, кантуемого в чашу после разливки плавки, т	Интервал времени между отключением аргоновой продувки и началом разливки плавки, мин					
	5	10	15	20	25	30
С мягким режимом продувки	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0	
Без мягкого режима продувки	2,5	2,0		1,5		

ми циклами разливки, высокой температурой и ограниченным временем внепечной обработки.

Для процесса перемещения шлаковых включений в кристаллизатор при смене сталеразливочного ковша (перековшовки) необходимо учитывать гидродинамические изменения потоков в промковше как для окончания, так и начала разливки плавки. Начало разливки из сталковша следующей плавки в серии характеризуется максимальным напором струи металла в промковш и наиболее интенсивными потоками, способствующими захвату и транспортировке включений в направлении стакан-дозаторов. При этом, чем выше концентрация включений в шлаке кристаллизатора, тем сильнее отклонение его физико-химических свойств от рабочих свойств шлакообразующей смеси [3].

Снижение сил трения между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора обеспечивается достаточным и равномерным поступлением жидкого шлака в имеющийся между ними зазор, и существенно зависит от толщины слоя жидкого шлака на поверхности металла в кристаллизаторе, которая для условий разливки со скоростью примерно до 1 м/мин составляет 7-10 мм, а для высокоскоростных МНЛЗ – 15-20 мм [5]. При недостаточной толщине слоя жидкого шлака сложно сохранить равенство скоростей плавления ШОС и инфильтрации шлака в зазор между заготовкой и кристаллизатором. В этом случае трудно также обеспечить равномерный слой ШОС по периметру кристаллизатора. Если толщина слоя жидкого шлака значительно превышает указанную величину, возникает вероятность образования над мениском металла в кристаллизаторе грубого ранта, который затрудняет проникновение жидкого шлака в зазор между слитком и кристаллизатором. Таким образом, толщина слоя жидкого шлака над зеркалом металла в кристаллизаторе может служить дополнительным критерием контроля за процессом разливки. Существенные отклонения толщины слоя от заданных значений свидетельствует о том, что процесс идёт не в оптимальном режиме и нужна корректировка технологических параметров [6].

Для определения взаимосвязи между толщиной, физико-химическими свойствами шлака в кристаллизаторе и их влиянием на стабильность технологического процесса непрерывной разливки серии плавки были выполнены промышленные исследования на слябовой МНЛЗ ККЦ ПАО «АМК».

На рис. 1 в хронологической последовательности представлено изменение минерального состава шлака, пробы которого были отобраны из кристаллизатора по ходу разливки серии из десяти плавки

стали марки Зсп под кислой ШОС, имеющей одинаковый химический состав.

Для определения толщины жидкого шлака в кристаллизаторе производили кратковременное погружение двух проволочек, стальной и алюминиевой, толщиной 1 мм в шлаковый расплав на поверхности мениска в кристаллизаторе и измеряли разницу в длине между оплавленными концами по шлаковой и стальной поверхностям. Значение толщины жидкого шлака в кристаллизаторе при отборе соответствующих указанному на рис. 1 порядку проб составляло 7 мм (первая плавка в серии), 20 мм (пятая) и 45 мм (окончание 10-й плавки в серии).

Структура образца (а), изъятая в начале серии, практически однородная стекловидная, с хорошо выраженными оптическими свойствами. Структуры образцов шлака (б) и (в) существенно отличаются от начальной (а) и характеризуются наличием не только стекловидной, но и кристаллической составляющих. Такие различия структуры обусловлены изменением физико-химических свойств шлака по ходу разливки серии и толщины его жидкого слоя в кристаллизаторе. Для фрагментов образцов шлаковых коро-

чек (рис. 1, г-е), отобранных в районе менисковой зоны практически одновременно с отбором образцов жидкого шлака, характерно преобладание стекловидной структуры в их нижней части, а на участках шлакового ранта преобладает кристаллическая структура. То есть свойства шлаковых коронок в подменисковой области близки к свойствам жидкого шлака, отобранного в начале разливки серии, что определяет способность проникновения шлакового расплава в зазор и выполнение необходимых технологических параметров смазки и теплоотвода.

Рассматривая верхнюю часть шлаковых коронок (без учёта непроплавленных фрагментов ШОС), можно предположить, что их свойства отличаются от свойств жидкого шлака, отобранного в начале разливки серии, так как в полученной при их затвердевании структуре преобладает кристаллическая фаза, особенно в последней пробе. Данная структура является продуктом концентрации компонентов, снижающих жидкоподвижность шлака и увеличивающих его температуру плавления [7]. Такой шлак концентрируется в верхней части шлакового расплава, смачивая стенки кристаллизатора, намерзает на них и образует рант кристаллического или смешанного минерального состава.

Выполненные исследования свидетельствуют о некоторой физико-химической гетерогенности шлакового расплава, в котором разнофазные компоненты распределены согласно плотности и законам гидродинамики над поверхностью стального мениска.

Так, на рис. 2 представлены фото проб шлака и мест их отбора с поверхности «чулка» непрерывнолитого сляба, на котором произошёл прорыв корочки заготовки под кристаллизатором.

Образцы шлака, представленные на рис. 2, г, были отобраны на участке ниже «прорывного» отверстия, отмеченного на рис. 2, б. Несомненно – это шлак с поверхности над стальным мениском в кристаллизаторе, который переместился в эту область после вытекания стали в результате прорыва.

В соответствии с данными табл. 2 можно сделать вывод, что химический состав шлаковой рубашки между заготовкой и стенкой кристаллизатора имеет явное отличие от состава шлака на поверхности мениска. При этом шлак с поверхности мениска не может являться фрагментом так называемого непроплавленного слоя ШОС в связи со значительным отличием его состава от исходного.

Важной характеристикой шлакового расплава, формирующегося

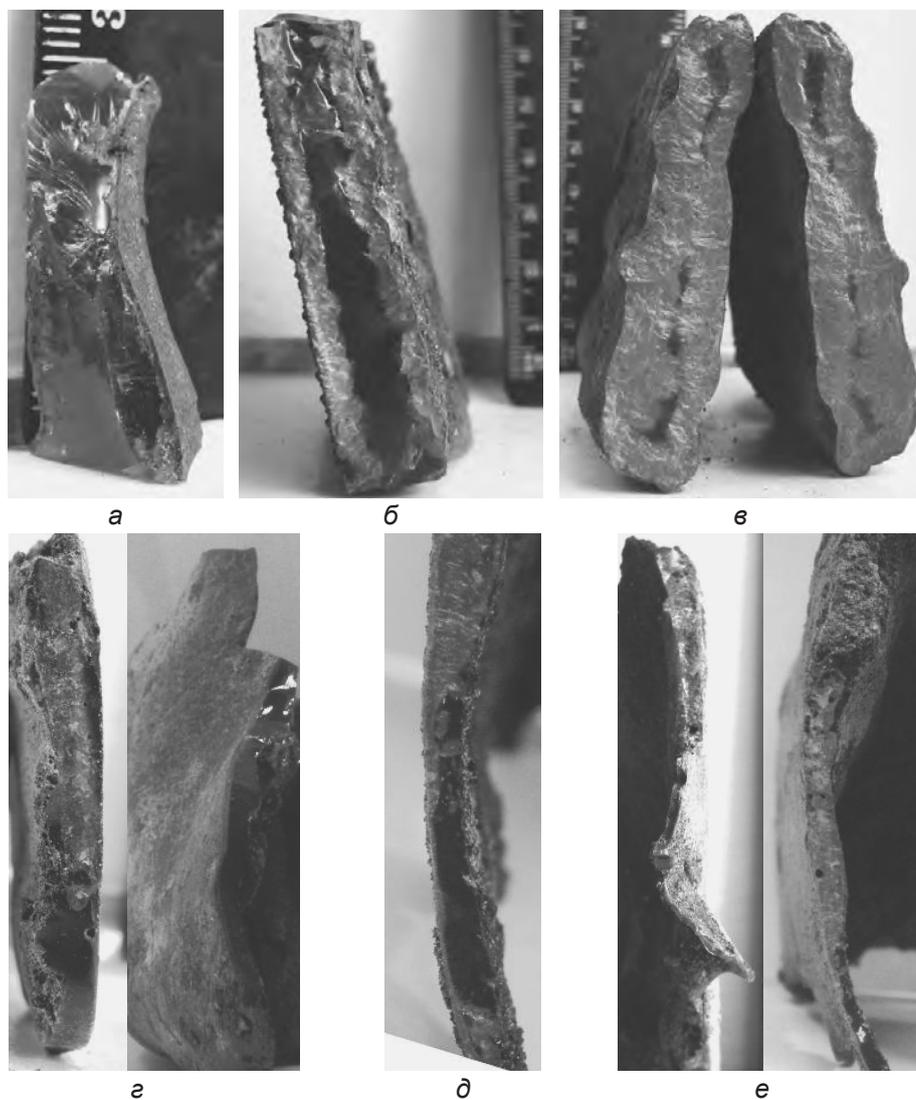


Рис. 1. Фрагменты проб шлака (а, б, в), отобранных с поверхности мениска металла и шлаковых корочек, образующихся в верхней части стенок кристаллизатора (г, д, е) в различные периоды разливки серии: середина 1-ой плавки (а, г), 5-ая плавка (б, д), 10-ая плавка (в, е)

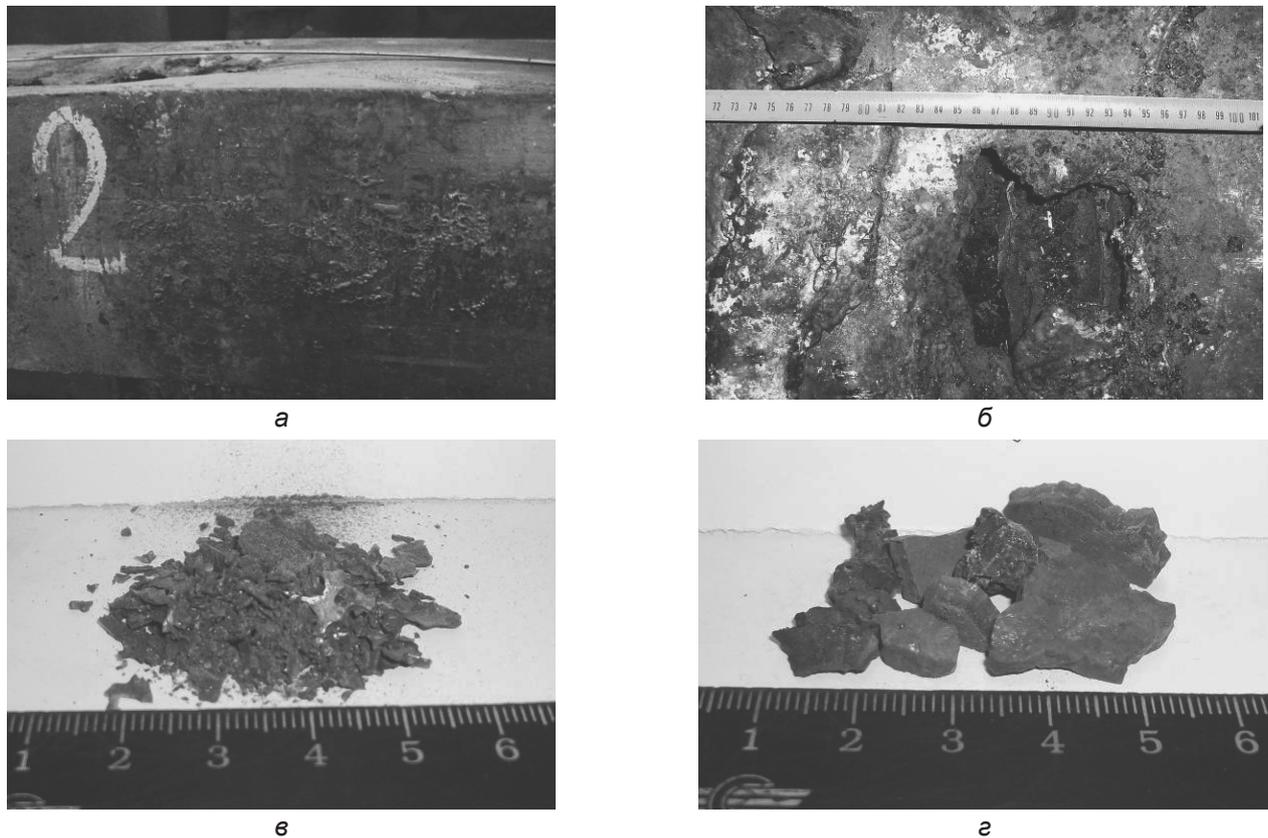


Рис. 2. Участки и внешний вид проб шлака, отобранных с поверхности непрерывнолитого сляба, на котором произошёл прорыв с: узкой правой грани (а, в); места прорыва грани малого радиуса (б, г)

Химический состав ШОС и проб шлака, отобранных от разных участков аварийного непрерывнолитого сляба

Таблица 2

Согласно данным работы [7], перемещение шлакового гарнисажа в направлении разлива происходит со скоростью, отличной от скорости вытягивания слитка. В работах [8, 9] описываются значительные перепады давления, действующего на шлаковую прослойку в зазоре при возвратно-поступательном движении кристаллизатора. Жидкий шлак, находящийся на стальном мениске и в зазоре между стенкой кристаллизатора и заготовкой, создаёт условия герметичности. В момент так называемого «раздевания» и усадки слитка, а также перемещения шлакового гарнисажа, давление в зазоре отрицательное. Соответственно наполняемость зазора шлаком будет зависеть непосредственно от его проникающей способности – вязкости. Таким образом, можно утверждать, что процесс поглощения или инфильтрации шлака зазором будет зависеть от давления в зазоре, пропускной его способности

Компоненты	Содержание, %		
	исходная ШОС	шлак	
		узкая грань	поверхность мениска
CaO	30,4±0,8	37,8	44,2
SiO ₂	35,8±1,5	40,9	34,7
Al ₂ O ₃	4,4±0,5	8,47	8,6
MgO	2,8±0,5	4,03	3,04
MnO	≤0,3	2,42	2,47
Fe ₂ O ₃	1,5±0,5	1,72	2,02
SO ₃	-	0,41	0,27
S	-	0,17	0,11
FeO	-	3,40	4,06
Fe _{общ}	-	0,68	0,53
P ₂ O ₅	≤0,3	-	-
Na ₂ O	7,9±0,5	-	-
K ₂ O	≤0,13	-	-
C _{общ}	11,3±1,5	-	-
CaO/SiO ₂	0,85	0,97	1,27

на поверхности металла в кристаллизаторе, является возможность его проникновения в зазор между плитой кристаллизатора и заготовкой для образования шлакового гарнисажа. Жидкий шлак должен равномерно затекать в образующийся зазор, обеспечивая при этом необходимый теплоотвод и снижение сил трения, возникающих при вытягивании заготовки.

и вязкости расплава. При образовании гетерогенного раствора более жидкоподвижные его объёмы будут свободнее проникать в зазор, а более вязкие – задерживаться на поверхности.

Для физического моделирования процесса проникновения шлакового расплава в зазор между стенкой кристаллизатора и заготовкой был выполнен

эксперимент, предусматривающий отбор проб жидкого шлака с поверхностной зоны одного кристаллизатора двумя разными способами с небольшим временным промежутком (менее 15 с). В первом случае пробу отбирали ложкой, а во втором использовали вакуумный пробоотборник типа SAVL для получения проб стали (со снятым стальным наконечником). Полученные образцы отличались как визуально, так и по химическому составу (табл. 3). Проба, отобранная вакуумным пробоотборником по внешнему виду и цвету напоминает «чёрное стекло», а ложкой – воластонит.

Для пояснения имеющихся отличий воспользуемся данными таблицы 4 [10], в которой представлено влияние увеличения содержания различных компонентов на свойства ШОС.

Из наиболее часто встречающихся неметаллических включений, оказывающих значительное влияние на свойства шлака в кристаллизаторе (табл. 3), можно отметить CaO , Al_2O_3 , а также показатель основности. Анализируя две опытные композиции шлака (табл. 3, 4) можно полагать, что проба шлака, отобранная с помощью вакуумного пробоотборника, обладает меньшей вязкостью и температурой плавления по сравнению с пробой, отобранной с помощью ложки. Таким образом, получено косвенное подтверждение возможности фазового разделения составляющих гетерогенного шлакового расплава при наличии специфических свойств инфильтрации шлака, как и в случае проникновения его в зазор между плитой кристаллизатора и формирующейся оболочкой заготовки, и постепенное увеличение толщины поверхностного шлакового расплава.

В технологическом плане попытки уменьшить количество шлакового расплава в кристаллизаторе путём сокращения расхода ШОС на тонну разливаемой стали, как правило, безуспешны. При уменьшении подачи свежих порций порошка или гранул расплав постепенно оголяется, что способствует теплоотдаче с мениска и его окислению. Объём накопившегося шлака, имеющего более высокую температуру плавления (по сравнению с исходной ШОС), охлаждается интенсивнее и начинает затвердевать сначала в углах кристаллизатора, а затем, образуя поверхностные корочки грубого ранта на стенках кристаллизатора, плавно охватывает весь его периметр. В таких условиях шлак попадает в зазор

неравномерно, толщина его при этом не уменьшается, но сокращается количество жидкого шлака, проникающего в зазор, и возможно образование участков кристаллизатора, не покрытых шлаком. В отсутствие равномерной смазки возможны подвисания формирующейся корочки заготовки на плите кристаллизатора. При изоляции поверхности расплава свежей ШОС, корочки и рант при невысоких колебаниях в кристаллизаторе расплавляются, но количество шлака также остаётся прежним. Одним из технологических приёмов в подобных случаях может быть так называемое обновление шлака (вычерпывание старого и наведение нового) или переход на другую ШОС.

Достижение предельного значения толщины шлака, при которой ухудшается процесс проникновения жидкого шлака в зазор между формирующейся оболочкой заготовки и плитой кристаллизатора, вызывает ухудшение качества заготовки и увеличивает

Таблица 3

Химический состав ШОС и проб шлака, отобранных из кристаллизатора различными способами

Компоненты	Содержание, %		
	исходная ШОС	шлак, отобранный	
		пробоотборником	ложкой
CaO	30,4±0,8	40,6	44,2
SiO ₂	35,8±1,5	40,0	37,0
Al ₂ O ₃	4,4±0,5	7,67	8,35
MgO	2,8±0,5	4,36	3,43
MnO	≤0,3	4,2	4,8
Fe ₂ O ₃	1,5±0,5	0,91	0,72
SO ₃	-	0,18	0,07
S	-	0,07	0,02
FeO	-	1,34	1,1
Fe _{общ}	-	0,67	0,31
P ₂ O ₅	≤0,3	-	-
Na ₂ O	7,9±0,5	-	-
K ₂ O	≤0,13	-	-
C _{общ}	11,3±1,5	-	-
CaO/SiO ₂	0,85	1,015	1,195

Таблица 4

Влияние увеличения содержания различных компонентов на свойства ШОС

Компоненты	Вязкость	Температура	
		затвердевания	плавления
CaO/SiO ₂	↓↓↓	↑↑↑	↑↑
Al ₂ O ₃	↑↑↑	↓↓	зависит от формы
Na ₂ O	↓	↓	↓↓↓
F	↓↓↓		↓
MnO	↓↓	↓↓	↓↓
MgO	↓	↓	↓
BaO			
Li ₂ O	↓↓↓	↓↓	↓↓↓↓
ZrO ₂	↑↑↑		↑↑↑

вероятность аварийности процесса – подвисания или прорыва вследствие повышения трения либо вторичного разогрева локальной зоны формирующейся оболочки непрерывнолитой заготовки при фрагментарном замещении шлакового гарнисажа газовым зазором (рис. 3).



Рис. 3. Фрагменты шлаковой корки подменисковой зоны с нарушением целостности поверхности

Фрагмент шлаковой корки, представленный на рис. 3, был отобран после замены погружного стакана и понижения уровня стали в кристаллизаторе при автоматической остановке процесса непрерывной разливки системой раннего оповещения прорывов «Mold Expert» на основании полученного сигнала «Alarm». При этом было визуально установлено локальное подвисание корочки заготовки на плите кристаллизатора. Затекание в зазор недостаточного количества шлака, связанное с отклонением его вязкостных свойств, приводит к нарушению целостности шлакового гарнисажа и не исключает прямого контакта оголённых участков оболочки заготовки со стенками кристаллизатора. Это приводит к локальному повышению трения, которое способствует подвисанию и (или) прорыву непрерывнолитой слитка. В свою очередь прорыв может быть обусловлен подвисанием либо недостаточной толщиной корочки заготовки в результате вторичного разогрева отдельных её участков. Теплопередача на этих локальных участках может быть нарушена возникновением газового зазора при отсутствии шлаковой прослойки. Такой механизм подвисаний и прорывов подтверждается присутствием фрагментов частиц меди в шлаке, отобранных с поверхности непрерывнолитого сляба в районе прорыва, что свидетельствует о наличии механического трения между плитой кристаллизатора и формирующейся стальной корочкой слитка.

Выводы

Для снижения негативных термо- и гидродинамических явлений, имеющих место при технологических переливах в процессе серийной разливки необходимо установить оптимальные условия её тем-

пературно-скоростного режима для определённых марок стали.

При подготовке плавки на УКП необходимо обеспечивать режим «мягкой продувки» и достаточную выдержку плавки перед началом разливки.

Для повышения эффективности процесса необходимо минимизировать количество печного шлака, попадающего в промковш и далее в кристаллизатор, который негативно влияет на физико-химические свойства ШОС, искажая условия теплоотвода и смазки между поверхностью формирующейся корочки слитка и рабочей поверхностью кристаллизатора.

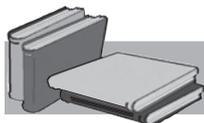
Основной причиной увеличения толщины жидкого шлака в кристаллизаторе является образование гетерогенного расплава над поверхностью стального мениска при повышении концентрации в нём различных включений эндогенного и экзогенного характера, способствующих увеличению вязкости и температуры плавления шлакового расплава в сравнении с базовой ШОС.

Инфильтрация шлака зазором между формирующейся оболочкой непрерывнолитой заготовки и плитой кристаллизатора носит дифференцированный характер по жидкоподвижным свойствам гетерогенной композиции расплава, что способствует накоплению вязких и тугоплавких композиций в гетерогенном расплаве.

Дефицит жидкой составляющей в гетерогенном шлаковом расплаве может быть вызван увеличением его толщины над стальным мениском и, соответственно, высокой концентрацией вязких и тугоплавких компонентов, что может стать причиной нарушения формирования целостности шлакового гарнисажа и замещением его инородной составляющей, в том числе газом. Последствием этого может быть локальное увеличение сил трения, способствующих повышенному износу материала кристаллизатора, возникновению подвисаний и прорывов.

Данный процесс регулируется скоростью диффузии или растворения в шлаковом расплаве внедряющихся неметаллических включений по отношению к скорости их ассимиляции, зависящей от количества и вида включений, а также скоростью инфильтрации шлакового расплава зазором между стенкой кристаллизатора и заготовкой. Таким образом, основное внимание необходимо уделять выбору ШОС, с точки зрения обеспечения необходимых для нормальной работы свойств в условиях, характерных для данного технологического процесса подготовки и рафинирования стали до момента поступления её в кристаллизатор.

Учитывая, что на практике имеют место случаи совершенно различного поведения шлака в кристаллизаторе при серийной разливке идентичных марок сталей под одной и той же ШОС, то эффект ассимиляции шлаком различных включений имеет непостоянную схему химических взаимодействий, меняющих композицию шлака. В этом случае большее значение имеет динамика и происхождение неметаллических включений в стали.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Ботников С. А.* Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С. А. Ботников. – Изд. 2-е. Волгоград: Панорама, 2011. – С. 72-78.
2. Разработка составов силикатных шлаковых расплавов для непрерывной разливки стали / Л. А. Смирнов, А. А. Смирнов, В. А. Старцев, Е. Н. Балахонов // *Екатиренбург: УрО РАН*, 2007. – 61 с.
3. *Смирнов А. Н.* Некоторые аспекты возникновения прилипания и прорывов корочки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. Н. Максаев. – М.: – *Электрометаллургия*. – 2013. – № 9. – С. 14-22.
4. *Смирнов А. Н.* Анализ поведения ШОС в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ и её влияние на образование прорывов / А. Н. Смирнов, Е. Н. Максаев, С. В. Куберский. – Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 38. – Алчевск: ДонГТУ, 2012 – С. 112-122.
5. *Смирнов А. Н.* Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
6. *Казачков Е. А.* Структура и свойства шлаков, образующихся из шлакообразующих смесей в кристаллизаторе МНЛЗ / Е. А. Казачков, С. В. Ларионова // *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету*: Вып. № 14, 2004. – С. 61-64.
7. *Carl-Åke Däcker.* The history of mould slag films downwards the mould and how it affects heat flux and shell growth in continuous casting of steels / Carl-Åke Däcker, Anders Salwén, Peter Andersson, Christer Eggertsson // *Materials & Process Development Department, Swerea KIMAB Box 55970, SE-102 16 Stockholm, SWEDEN carlake.dacker@swerea.se*
8. *Takeuchi E.* The Formation of oscillation marks in the continuous casting of steel slabs / E. Takeuchi, G. K. Brimacombe. – *Met. Trans.*, 1984. – V. 15B, Sept. – № 1-4. – P. 493-509.
9. *Dauby P. H.* Lubrication and oscillation of the mold – two intimaly related parameters / P. H. Dauby, W. H. Emling, R. Sobolewski et al. – *Fachberichte Huttenpraxis, Metallweiterverarbeitung*, 1987. – V. 25. – № 8. – P. 668-675.
10. *Phillips R. J.* Improved Afax Mould Fluxes for High Speed Casting with Emphasis on Special Requirements for Thin Slab Casting [Електронний ресурс] / R. J. Phillips, S. K. Das // *Foseco International Limited*. – Режим доступа к странице: http://70.84.87.240/pdfs/technical_papers/05.pdf.

Анотація

Смірнов О. М., Куберський С. В., Максаєв Є. М.

Зміна експлуатаційних властивостей шлакоутворюючих сумішей при серійному розливанні та їх вплив на хід процесу безперервного лиття

Проаналізовано причини збільшення товщини рідкого шлаку в кристалізаторі і впливу його на сили тертя, тепловідведення, вірогідність утворення підвисань та проривів оболонки безперервнолітої заготовки.

Ключові слова

пічний шлак, воронкоутворення, кристалізатор, шлаковий розплав, асиміляція, шлаковий гарнісаж, фазовий склад, структура, гетерогенність, інфільтрація, тепловідведення, тертя, підвисання, прорив

Summary

Smirnov A., Kuberskiy S., Maksaev E.

Change of working properties for slag-forming mixtures during sequence casting and its effect on continous casting process

The reasons of liquid slag layer thickness increase in the mold and its effect on friction force, heat removing, possibility of bridging formation and continuous casting shell breakthrough are analyzed.

Keywords

furnace slag, vortex, mold, molten slag, assimilation, slag-skull, phase composition, structure, heterogeneity, infiltration, heat, friction, sticking, breakout

Поступила 15.09.2015