

УДК 669:621.746.5.047

д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
Максаев Е.Н.
(ПАО «АМК», г. Алчевск, Украина),
к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ШОС В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОРЫВОВ

Проведено аналіз основних причин збільшення товщини шлаку в кристалізаторі і впливу її на сили тертя, тепловідведення, вірогідність утворення підвисань та проривів оболонки безперервнолитої заготовки.

Ключові слова: *кристалізатор, шлаковий розплав, асиміляція, шлаковий гарнісаж, фазовий склад, структура, гетерогенність, інфільтрація, тепловідведення, тертя, підвисання, прорив.*

Выполнен анализ основных причин увеличения толщины шлака в кристаллизаторе и влияния ее на силы трения, теплоотвод, вероятность образования подвисаний и прорывов оболочки непрерывнолитой заготовки.

Ключевые слова: *кристаллизатор, шлаковый расплав, ассимиляция, шлаковый гарниссаж, фазовый состав, структура, гетерогенность, инфильтрация, теплоотвод, трение, подвисание, прорыв.*

Благодаря высокому уровню технологических возможностей и программного обеспечения современных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), аварийность процесса непрерывной разливки существенно снижена, но вопрос прорывов корочки непрерывнолитой заготовки в настоящее время остаётся достаточно актуальным. Большинство прорывов, не связанных с прямым нарушением технологии и состоянием оборудования МНЛЗ, относятся 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.

При создании оптимальных условий обеспечивающих безаварийную непрерывную разливку особое внимание уделяется шлакообразующим смесям (ШОС) для кристаллизатора, которые должны способствовать эффективному отводу тепла и обеспечивать минимальное трение заготовки о стенки кристаллизатора для конкретных температурно-скоростных характеристик, свойственных различным маркам сталей. Как показывает опыт, выбор эффективной ШОС должен осуществляться для каждого конкретного предприятия и зависит не только от технологии разливки и технических возможностей МНЛЗ, но и от технологии внепечной подготовки металла. В данном случае подразумевается тот факт, что основное внимание при выборе ШОС уделяется ее исходному составу, а не «искажённой» композиции шлака, получаемого на поверхности мениска в кристаллизаторе после взаимодействия его с разливаемой сталью.

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 ее 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].

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 [3]. 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 равнотолщинный 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 идет не в оптимальном режиме и нужна корректировка его технологических параметров [4].

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

На рисунке 1 в хронологической последовательности представлено изменение минерального состава шлака, пробы которого были отобраны из кристаллизатора по ходу разливки серии из десяти плавов стали марки ЗСП под кислой ШОС, имеющей одинаковый химический состав.

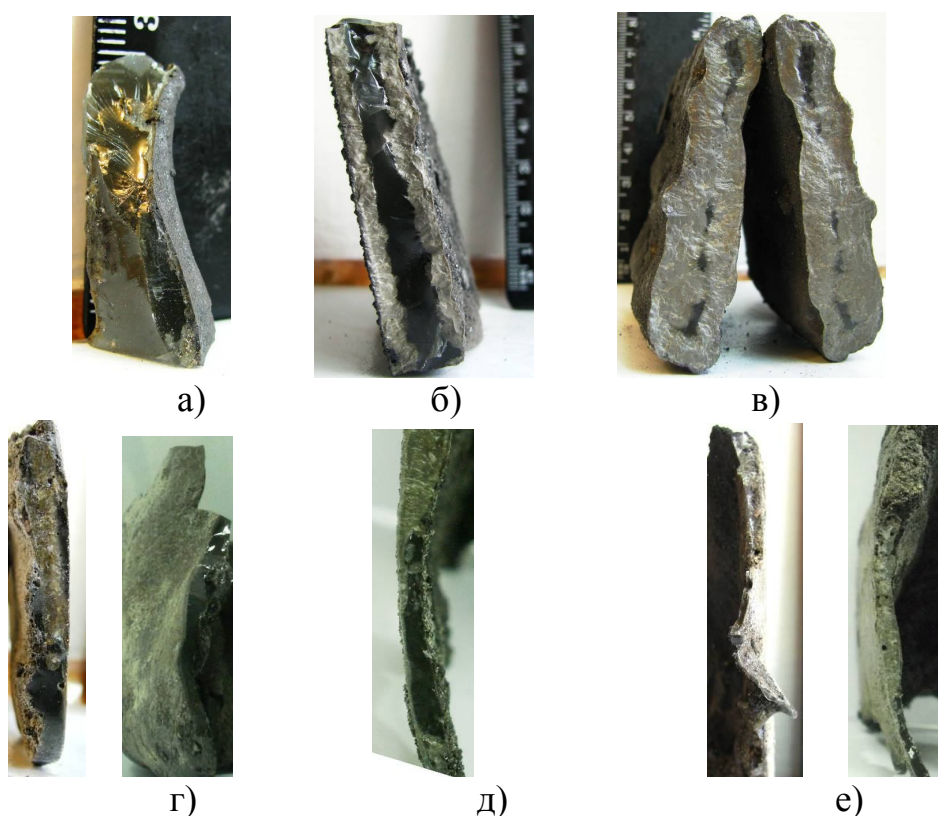


Рисунок 1 – Фрагменты проб шлака (а, б, в) отобранных с поверхности мениска металла и шлаковых корочек, образующихся в верхней части стенок кристаллизатора (г, д, е) в различные периоды разливки серии: а), г) середина 1-ой плавки б), д) 5-ая плавка, в), е) 10-ая плавка

Для определения толщины жидкого шлака в кристаллизаторе производили кратковременное погружение двух проволочек, стальной и алюминиевой, толщиной 1 мм в шлаковый расплав на поверхности ме-

ниска 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 рисунке 1 порядку проб составляло 7 мм (первая плавка в серии), 20мм (пятая) и 45мм (окончание последней 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 корочек (г, д, 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. Т.е. свойства шлаковых корок 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 корок (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 [5]. Такой шлак концентрируется в верхней части шлакового расплава, смачивая стенки кристаллизатора, замерзает на них и образует рант кристаллического или смешанного минерального состава.

Обобщая выполненные исследования, можно предположить некоторую физико-химическую гетерогенность шлакового расплава, в котором разнофазные компоненты распределены согласно плотности и законов гидродинамики над поверхностью стального мениска.

Предположения о возможности существования гетерогенных шлаковых расплавов в кристаллизаторе подтверждены в ходе наших последующих исследований.

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

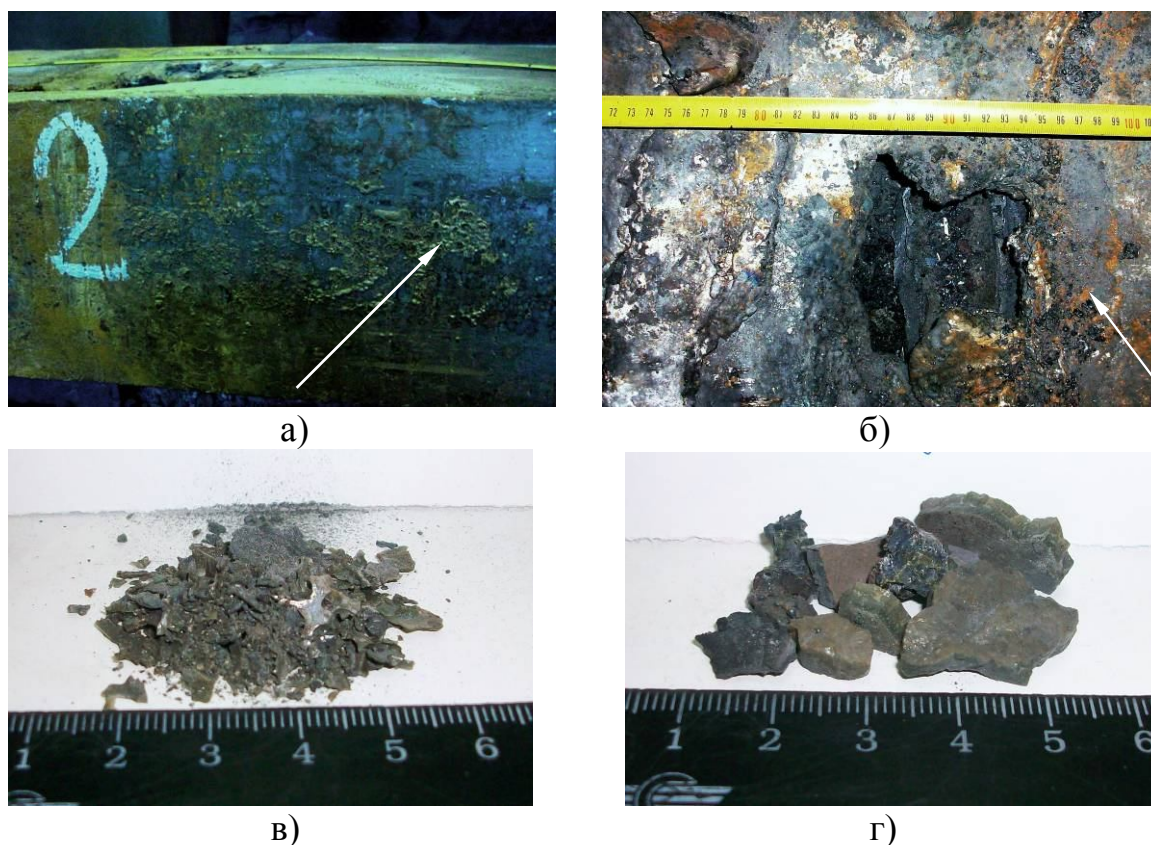


Рисунок 2 – Фото участков и внешний вид проб шлака отобранных с поверхности непрерывнолитого сляба, на котором произошёл прорыв: а), в) с узкой правой грани; б), г) с места прорыва грани малого радиуса

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

В соответствие с данными таблицы 1 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 значительно искажённым его составом относительно исходного.

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

Таблица 1 – Химический состав ШОС и проб шлака, отобранных с разных участков аварийного непрерывнолитого сляба

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

Согласно данным работы [5] перемещение шлакового гарниссажа в направлении разлива происходит со скоростью отличной от скорости вытягивания слитка. В работах [6, 7] приводятся данные, о значительных перепадах 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 гарниссажа 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 и вязкость расплава. При образовании гетерогенного раствора более жидкоподвижные его объёмы будет 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 способа-

ми 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 имели как визуальное отличие, так и по химическому составу (таблица 2). Проба отобранная вакуумным пробоотборником по внешнему виду и цвету напоминает «черное стекло», а ложкой волластонит.

Таблица 2 – 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	37
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

Для пояснения имеющихся отличий воспользуемся данными таблицы 3 [8], 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, согласно таблицы 3, можно отметить CaO, Al₂O₃, а также показатель основности. Сравнивая две опытные композиции шлака, представленные в таблице 2 с помощью таблицы 3 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 о возможности фазового разделения составляющих ге-

терогенного 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.

Таблица 3 – 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	↑↑↑	↓↓	↑↑↑

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, имеющий более высокую температуру плавления (по сравнению с исходной ШОС), охлаждается интенсивнее и начинает затвердевать в начале 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 подвисяния 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 фор-

мирующей оболочкой заготовки и плитой кристаллизатора, вызывает ухудшение качества заготовки и увеличивает вероятность аварийности процесса – подвисяния или прорыва вследствие повышения трения либо вторичного разогрева локальной зоны формирующейся оболочки непрерывнолитой заготовки при фрагментарном замещении шлакового гарниссажа газовым зазором (рисунок 3).



Рисунок 3 – Фрагменты шлаковой корки подменисковой зоны с нарушением целостности поверхности

Фрагмент шлаковой корки, представленной на рисунке 4 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 подвисяние корочки заготовки на плите кристаллизатора. Затекание в зазор недостаточного количества шлака, связанное с отклонением его вязкостных свойств, приводит к нарушению целостности шлакового гарниссажа и не исключает прямого контакта оголенных участков оболочки заготовки со стенками кристаллизатора. Это приводит к локальному повышению трения, которое способствует подвисянию и (или) прорыву непрерывнолитого слитка. В свою очередь прорыв может быть обусловлен подвисянием либо недостаточной толщиной корочки заготовки в результате вторичного разогрева отдельных ее участков. Теплопередача на этих локальных участках может быть нарушена возникновением газового зазора в отсутствие шлаковой прослойки. Такой механизм подвисяний и прорывов подтверждается присутствием фрагментов частиц меди в шлаке, отобранном с поверхности непрерывнолитого сля-

ба в районе прорыва, что свидетельствует о наличии механического трения между плитой кристаллизатора и формирующейся стальной коркой слитка.

В качестве выводов по проведенной работе можно отметить следующее:

- основной причиной увеличения толщины жидкого шлака в кристаллизаторе является образование гетерогенного расплава над поверхностью стального мениска при повышении концентрации в нем 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 гарниссажа 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 данному технологическому процессу 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.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение возможности уменьшения вязкости жидкого шлака по ходу серийной раз-

ливки за счет изменения его химического состава присадкой необходимых компонентов и разработку технологических рекомендаций по управлению процессом непрерывной разливки слябов в условиях возникновения аварийных ситуаций фиксируемых системой раннего оповещения прорывов «Mold Expert».

Библиографический список

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. Смирнов Л.А. Разработка составов силикатных шлаковых расплавов для непрерывной разливки стали / Л.А. Смирнов, А.А. Смирнов, В.А. Старцев, Е.Н. Балахонов // Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 61 с.

3. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штенан // Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482с.

4. 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.

5. 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

6. 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.

7. 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, Metallweiterverbrbeitutung, 1987. - V.25, № 8. - P. 668-675.

8. Improved Afax Mould Fluxes for High Speed Casting with Emphasis on Special Requirements for Thin Slab Casting [Электронный ресурс] / R.J. Phillips, S.K. Das // Foseco International Limited.– Режим доступа к странице: http://70.84.87.240/pdfs/technical_papers/05.pdf.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.