

*д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
Максаев Е.Н.,
Довгалиук Г.Я.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ЗАПРЕССОВАННЫХ СКОПЛЕНИЙ ОКАЛИНЫ И ШЛАКА НА ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА

Проведено дослідження основних причин утворення дефекту поверхні безперервнолитого сляба у вигляді запресованих скупчень окалини і шлаку. Запропоновано рекомендації для поліпшення якості поверхні сляба.

Ключові слова: *безперервне розливання, сляб, кристалізатор, приводні ролики, витягування, хитання, шлакоутворювальна суміш, окалина.*

Проведены исследования основных причин образования дефекта поверхности непрерывнолитого сляба в виде запресованных скоплений окалины и шлака. Предложены рекомендации для улучшения качества поверхности сляба.

Ключевые слова: *непрерывная разливка, сляб, кристаллизатор, приводные ролики, вытягивание, качание, шлакообразующая смесь, окалина.*

Металлургическое производство Украины является экспортно ориентированной отраслью, в объеме которой значительную долю занимает полупродукт в виде непрерывнолитых заготовок и слябов.

Для развития экспортного потенциала отечественных предприятий достаточно важное значение приобретает качество и состояние поверхности непрерывнолитого металла. Особое внимание при этом уделяется технологическим приемам, способствующим минимизации налипания окалины и шлака на сляб, а также уменьшению количества рельефных деформаций на поверхности заготовки.

Как правило, деформации (вмятины) на широких гранях слябов появляются вследствие интенсивного процесса окалинообразования и вдавливания кусков окалины в тело сляба. При этом наибольший негативный эффект следует связывать с явлением налипания части окали-

ны на внешнюю поверхность роликов («наматывания»), что приводит к вдавливанию отпечатка окалины в поверхность сляба и деформаций его поверхности [1].

Достижение положительного результата при устранении появления дефекта непрерывнолитой заготовки возможно только в случае правильности определения природы его образования. Как правило, это обстоятельства взаимодействия нескольких факторов, прямым или косвенным образом оказывающих влияние на зарождение и развитие дефекта.

Поэтому целью представленной работы был анализ основных причин образования дефектов поверхности непрерывнолитого сляба в виде запрессованных скоплений окалины и шлака и разработка рекомендаций способствующих повышению качества поверхности непрерывнолитых слябов.

В работе [2] исследовано нарушение процесса вытягивания непрерывнолитых слябов толщиной 200 и 220 мм при проскальзывании приводных роликов по их поверхности в условиях ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК»). Основные причины проскальзывания обусловлены недостаточным прижатием поверхностей приводных роликов и сляба вследствие превышения механического ресурса оборудования роликотводки сегментов МНЛЗ, а также нарушениями соосности роликотводного полотна обоих радиусов из-за неравномерного износа бандажей роликов.

Установлено, что наибольшее количество проскальзываний при одном и том же состоянии оборудования наблюдалось при разливке низкоуглеродистых, перитектических нелегированных и низколегированных марок с содержанием углерода 0,03-0,16%, склонных к образованию большего количества окалины на поверхности сляба. После разливки таких сталей на многих роликах сегментов оставалась налипшая окалина, что обусловлено нарушением нормального протекания процесса отвода тепла охлаждающей жидкостью от поверхности бочки ролика. Ухудшение теплоотвода через бочку ролика к охлаждающей воде, связано с недостаточным расходом охладителя и снижением коэффициента теплоотдачи вследствие появления слоя накипи на поверхности внутренней полости ролика [1]. Демонтаж роликов, которые наматывали окалину, показал, что во всех случаях наблюдается значительное уменьшение сечения внутренних каналов охлаждения и подводов к ним из-за большого количества отложений накипи. Кроме того, для роликов, вращение которых во время разливки отличалось от нормального режима (подклинивание, простаивание) имело место радиально-несимметричное заполнение каналов накипью.

Немаловажным фактором, влияющим на склонность роликов к наматыванию окалины, является характер износа их поверхности. Наличие даже небольшой сетки разгара на бандаже ролика способствует хорошему сцеплению их с окалиной, которая заполняет трещины и полости на поверхности ролика, теплоизолируя его локальные участки и создавая условия для их ускоренного износа (образования выщерблен и сколов). Чаще всего это происходило с верхними роликами горизонтальных сегментов, где интенсивность форсуночного охлаждения намного ниже, чем в выпрямляющих и радиальных сегментах, а горизонтальное положение плоскости заготовки способствует сохранению окалинообразований на верхней грани.

Таким образом, присутствующая прослойка окалины между роликом и заготовкой во многом определяет трение и теплообмен на участках их непосредственного контакта. Можно предположить, что окалина в этом случае играет роль сухой смазки, снижая контактное трение приводных роликов с поверхностью слитка, а также нарушая синхронность между скоростью вращения приводных роликов и вытягивания сляба.

При исследовании факторов нестабильного вытягивания непрерывнолитой заготовки в период эксплуатации МНЛЗ с неудовлетворительным состоянием роликовой проводки было обращено внимание на один из специфических видов дефекта поверхности в виде запрессованных скоплений окалины и шлака (рисунок 1) при разливке сталей с содержанием углерода 0,08-0,16%.



Рисунок 1 – Фрагмент поверхности сляба марки С091ТМ с дефектом поверхности – запрессованными участками скопления окалины и шлака

Поверхность заготовки в кристаллизаторе формируется в условиях хорошей защиты от вторичного окисления. Доказательством этого может служить светлый вид твердой корочки, получаемой при прорывах. Между тем в кристаллизаторе на поверхности заготовки образуется некоторый слой шлакообразующей смеси (ШОС) сохраняющийся при движении сляба в ЗВО. Толщина слоя ШОС зависит от ряда параметров: скорости разливки, амплитудно-частотных параметров качания кристаллизатора, геометрической формы заготовки, физико-химических свойств смеси (температура плавления и размягчения, вязкость в области температур разливки и др.) [1].

Рассматривая процесс отклонения фактической скорости вытягивания сляба от скорости, фиксируемой энкодерами приводных роликов, необходимо принимать во внимание тот факт, что основным условием для изменения параметров работы механизма качания (значения частоты и амплитуды) при выбранном для соответствующей марки стали режиме (таблицы 1 и 2), является скорость вытягивания слитка, а точнее скорость вращения приводных роликов.

Таблица 1 – Режимы качания для некоторых групп марок сталей

Группа марок стали	Режим качания кристаллизатора	Толщина сляба, мм
[C] < 0,02 – ультра низколегированная, 0,02 ≤ [C] ≤ 0,06 – низкоуглеродистая	1	200, 220
	2	250, 300
0,07 < [C] ≤ 0,08 – доперитектическая, 0,09 ≤ [C] ≤ 0,15 – перитектическая	3	200, 220
	4	250, 300
0,15 ≤ [C] ≤ 0,24 – среднеуглеродистая	5	200, 220
	6	250, 300
[C] > 0,24 – высокоуглеродистая, [C] > 0,24 – ультра высокоуглеродистая	7	200, 220
	8	250, 300

Таблица 2 – Основные параметры различных режимов качания кристаллизатора

Параметры		Единицы измерения	Режим качания			
			1	2	3,5,7	4,6,8
Амплитуда при $V_{\Gamma}=0$ м/мин	C1-	мм	2	2	3	3
Коэффициент изменения амплитуды от V_{Γ}	C2-	мм/(м/мин)	4	4	4	4
Частота при $V_{\Gamma}= 0$ м/мин,	C3-	цикл/мин	170	170	160	160
Коэффициент изменения частоты от V_{Γ}	C4-	–	-20	-20	-15	-15
Отрицательный коэффициент полюсы	C5-	–	0,0	0,0	0,0	0,0
Коэффициент несинусоидальности	C6-	–	0,5	0,6	0,6	0,7

На МНЛЗ ПАО «АМК» установлены гидравлические механизмы качания кристаллизатора обеспечивающие частоту до 400 качаний в минуту и ход до 19 мм. Согласно алгоритма работы системы осцилляции, МНЛЗ ПАО «АМК», частота колебаний F вычисляется по формуле (1)

$$F=C3+((Vr\cdot C5)/2\cdot A)+Vr\cdot C4, \quad (1),$$

где Vr – скорость разливки;

A – амплитуда качания, вычисляемая по формуле (2)

$$A = C1+(Vr\cdot C2) \quad (2)$$

$C1-C5$ – факторы, зависящие от режима качания кристаллизатора для соответствующей группы марок сталей (таблица 1).

Процесс проникновения шлака непосредственно в зазор между заготовкой и стенкой кристаллизатора, и формирование в нем шлаковой прослойки является наиболее ответственным в работе ШОС, так как этим процессом фактически определяется возможность образования поверхностных и подповерхностных дефектов заготовки, а также вероятность прорыва металла. На этом этапе существенную роль играют вязкость и температура затвердевания ШОС («температура излома»), поверхностное натяжение на границах шлак – твердый металл и шлак – кристаллизатор, величина теплового потока от заготовки к кристаллизатору, а также стабильность поступления жидкого шлака с поверхности расплавленного металла через участок мениска [3].

Таким образом, каждый полный ход качания кристаллизатора от верхней до нижней позиции определяет так называемый шаг кристаллизации непрерывно формирующейся оболочки сляба. При шаге качания происходит поглощение порции расплава ШОС по периметру границы стенки кристаллизатора и корочки заготовки. Важным моментом в стабильности этого процесса необходимо считать оптимальные соотношения амплитуды, частоты качания кристаллизатора, вязкости и температуры плавления ШОС для каждой группы химического состава разливаемых марок стали.

Известно, что часть жидкого шлака затвердевает при контакте со стенкой кристаллизатора до стеклообразного состояния [4]. Ниже мениска шлаковая рубашка состоит из твердого слоя крупных и мелких кристаллов и тонкого слоя жидкого шлака, расположенного близко к поверхности стали и снижающего трение [5]. При фактическом замедлении или остановке слитка в случаях даже небольшой пробуксовки приводных роликов происходит так называемое зависание первично кри-

сталлизирующегося участка заготовки относительно качающегося кристаллизатора. Скорость качания в этом случае начинает превышать номинальное значение в соотношении с фактической скоростью вытягивания слитка, предусмотренной алгоритмом. Корочка слитка с каждым шагом качания продолжает усаживаться, увеличивая при этом зазор между стенкой заготовки и кристаллизатором. В результате, новые порции жидкой ШОС проникая в увеличивающийся зазор, способствуют утолщению затвердевшей стеклообразной массы неравномерно распределяющейся по периметру поверхности заготовки, нарушая при этом условия теплоотвода. Характеристики трения в кристаллизаторе в этих условиях крайне не стабильны (рисунок 2).

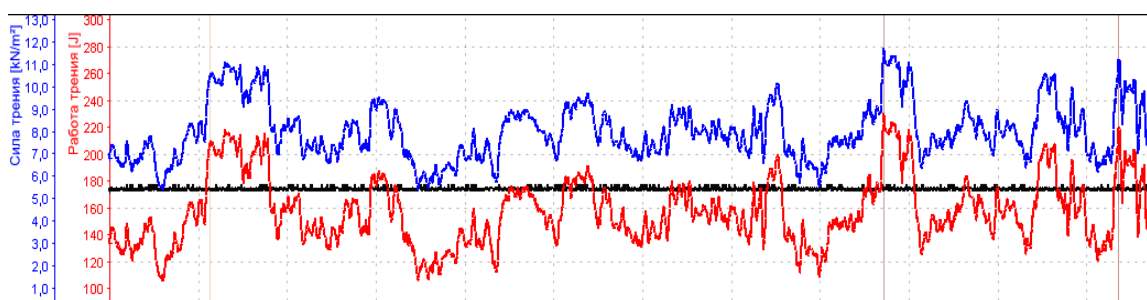


Рисунок 2 – График трения в кристаллизаторе в условиях нестабильного вытягивания слитка

Кроме того, колебания уровня металла в кристаллизаторе (рисунок 3), вызванные нестабильным вытягиванием заготовки [2], способствуют неравномерному попаданию большого количества гетерогенной ШОС (состоящей из твёрдой – начальной, расплавленной, и затвердевшей, в результате многократного контакта с медной стенкой кристаллизатора, а также наслоений твёрдых шлаковых корочек образовавшихся в процессе колебания уровня мениска) в зазор между сформированной заготовкой и стенкой кристаллизатора. Это также является фактором способствующим нарушению теплоотвода при формировании оболочки непрерывнолитого сляба и её прорывам под кристаллизатором.

При дальнейшем перемещении непрерывнолитой заготовки вдоль роликовой проводки участки скопления затвердевшей ШОС в зоне вторичного охлаждения дополняет окалина, состоящая в основном из вюститита с малыми добавками магнетита (Fe_3O_4) и гематита (Fe_2O_3) [3], формируя новые прочностные свойства смеси окалины и шлака. Высокая твёрдость такого конгломерата позволяет ему запрессовываться в поверхность слитка (в данном случае глубиной до 7 мм). Ввиду недостаточных пластических свойств смеси окалины и шлака при достижении температуры поверхности сляба ниже $1150\text{ }^{\circ}C$ – твёрдые пластинки отделяются от поверхности внешнего радиуса заготовки, начиная с зоны

загиба, и смываются водой форсуночного охлаждения, а вмятины поверхности сглаживаются по мере перемещения по роликовой проводке.

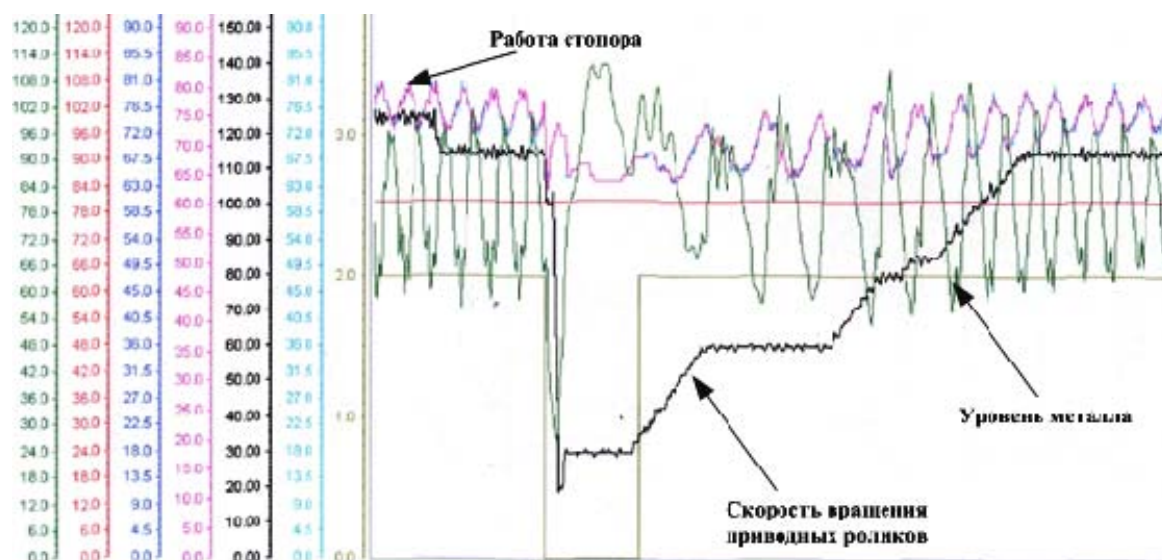


Рисунок 3 – График колебаний уровня металла в кристаллизаторе при неравномерном вытягивании непрерывнолитой заготовки

При проведении исследований разливку осуществляли под ШОС №1, №2 и №3 имеющими вязкость (при 1300 °С) соответственно 0,17 Па·с, 0,21 Па·с и 0,6 Па·с. Наибольшее проявление данного вида дефекта в моменты нестабильного вытягивания сляба из кристаллизатора наблюдалось при разливке под ШОС №1 с более низкой вязкостью, а наименьшее при использовании ШОС №3.

Определение значения отклонения фактической скорости сляба от скорости вращения приводов производилось сравнением длины непрерывнолитой заготовки за пройденное время от начала разливки до машины газовой резки. При скорости вытягивания приводов 1,3 м/мин фактическая средняя скорость перемещения заготовки составила 1,19 м/мин. В соответствии с алгоритмом расчёта параметров качания (формулы 1, 2 и таблицы 2) можно определить значения их отклонений при нарушении процесса вытягивания непрерывнолитого сляба. В данном случае использовались параметры качания для перитектических марок стали. Расчётные данные представлены в таблице 3.

Параметры качания характерные для режима 4 (таблица 3) отличаются от остальных большей амплитудой и скоростью опережения сляба при ходе вниз (исходя из значения коэффициента несинусоидальности), что в сочетании с низкой вязкостью смеси обеспечивает ее больший расход. Кроме того, важным фактором, способствующим дополнительному расходу смеси, является отклонение параметров ка-

чания и высокие колебания уровня металла в кристаллизаторе, при которых создаются условия для формирования и транспортировки более толстого слоя шлака по высоте кристаллизатора и за его пределы. В периоды разливки при нестабильном вытягивании сляба (проскальзывании приводных роликов) определено, что расход ШОС №1 был увеличен на 0,03 кг/т в отличие от нормальных условий разливки.

Таблица 3 – Расчётные значения отклонений параметров качания при нарушениях процесса вытягивания сляба

Скорость м/мин		Параметры качания кристаллизатора				
		Амплитуда, мм	Частота, 1/мин	Скорость, м/мин		
				средняя	хода вниз,	хода вверх,
вращения приводных роликов	1,30	8,20	140,50	1,15	1,38	0,92
перемещения сляба	1,19	7,76	142,15	1,10	1,32	0,88
Отклонения:	0,11	0,44	-1,65	0,05	0,06	0,04

Замена ШОС №1 более вязкой ШОС №2 при тех же условиях разливки слябов стали 09Г2С, способствовала заметному улучшению качества поверхности сляба (рисунок 4).



Рисунок 4 – Фрагмент поверхности сляба марки 09Г2С при разливке которого была произведена замена ШОС №1 на ШОС №2

Таким образом, ухудшение качества поверхности опорных роликов в результате механического и термического износа и теплоотвода вследствие отложения накипи на внутренней поверхности роликов способствует развитию процесса наматывания ими окалина образующейся на непрерывнолитом слябе.

Налипшая окалина, снижая контактное трение приводных роликов с поверхностью слитка, способствует их проскальзыванию, нарушая синхронность между скоростью вращения приводных роликов и вытягивания сляба. Поэтому, модели скорости перемещения слитка, построенные на скорости вращения приводных роликов, не всегда обеспечивают передачу достоверных данных для последующих взаимосвязанных расчётов осуществляемых действующими алгоритмами программ управления МНЛЗ.

Одной из вероятных причин образования на поверхности сляба дефектов в виде запрессованных скоплений окалина и шлака может быть проскальзывание приводных роликов, что способствует превышению номинального значения скорости качания в соотношении с фактической скоростью вытягивания слитка, колебаниям уровня металла в кристаллизаторе, попаданию большого количества гетерогенной ШОС в зазор между заготовкой и стенкой кристаллизатора и ухудшению условий теплоотвода.

В ЗВО скопления затвердевшей ШОС дополняет окалина, и формируются конгломераты способные вдавливаясь роликами в поверхность сляба ухудшая его качество.

Значительное улучшение качества поверхности в условиях нестабильного вытягивания сляба имеет место при разливке стали под ШОС с большей вязкостью.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию параметров качания кристаллизатора в условиях использования различных по физико-химическим свойствам ШОС, а также уточнение механизма образования на поверхности сляба запрессованной смеси ШОС и окалина.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н. Особенности явления "наматывания" окалина опорными роликами слябовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.Ю. Цупрун, Е.В. Новикова, В.В. Кислица, С.А. Нагорный. - *Сталь*, 2008. – № 4. – С. 19-22.

2. Смирнов А.Н. Оптимизация условий работы вытягивающей системы слябовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, Е.Н. Максаев, С.В. Куберский, В.С. Ессельбах // *Сборник научных трудов*, вып. №34. – Алчевск: ДонГТУ. – 2011. – С. 131–140.

3. Смирнов А.Н. Свойства шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали с повышенной скоростью / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, М.В. Епишев, А.Ю. Цупрун // *Металл и литье Украины*. – 2006. – №1. – С.55-57.

4. Meng Y. Simulation of microstructure and behaviour of interfacial mold slag layers in continuous casting of steel / Y. Meng, B.G. Thomas // *ISIJ Intern.* – 2006. – Vol. 46, – № 5. – P. 660-669.

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

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