

УДК 621.746.5.047 № 5-2015

**А. Н. Смирнов, Е. Н. Максаев\*, С. В. Куберский\*\*,  
В. Г. Ефимова\*\*\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*ПАО «Алчевский металлургический комбинат», Алчевск

\*\*Донбасский государственный технический университет, Алчевск

\*\*\*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

## **ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ПОДВИСАНИЕ И ПРОРЫВ ОБОЛОЧКИ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ**

*Проведён анализ влияния неметаллических включений на дефектообразование и прорывы формирующейся оболочки непрерывнолитой заготовки. Представлены основные схемы перемещения и внедрения неметаллических включений в металле и шлаке на этапе формирования оболочки непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе. Предложены рекомендации для повышения чистоты разливаемой стали, снижения дефектообразования и вероятности образования прорывов, а также повышения выхода годной стали.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, сталь, включения, дефекты, формирующаяся оболочка, подвисяние, прорыв, кристаллизатор.

*Проведено аналіз впливу неметалевих включень на дефектоутворення і прориви оболонки безперервнолітої заготовки в кристалізаторі. Представлено основні схеми переміщення і занурення неметалевих включень в металі і шлаці на етапі формування оболонки безперервнолітої заготовки в кристалізаторі. Запропоновано рекомендації для підвищення чистоти сталі, що розливається, зниження ймовірності утворення дефектів і проривів, а також підвищення виходу придатної сталі.*

**Ключові слова:** безперервне розливання, сталь, включення, дефекти, оболонка, що формується, підвисання, прорив, кристалізатор.

*The influence of non-metallic inclusions in the formation of defects and breakthroughs shell continuous casting. Schemes movement of nonmetallic inclusions in the metal and slag at the stage of the shell mold in continuous casting. Recommendations for improving the purity of steel and reduce defects and preventing breakouts.*

**Keywords:** continuous casting of steel, inclusions, defects, being formed shell, moment of suspension, with the breakthrough, mold.

Одним из основных направлений получения качественной металлопродукции является повышение её чистоты по неметаллическим включениям (НВ). Присутствующие в стали НВ способствуют снижению механических свойств, нарушению течения металла при деформациях, оказывают влияние на перераспределение дефектов структуры и перемещения дислокаций [1].

Большая часть поверхностных и внутренних дефектов, образующихся в непрерывном слитке, обусловлена наличием в стали НВ определённого химического состава и размеров. Авторы работ [2-5] основное внимание акцентируют на дефектообразовании при проникновении НВ в формирующуюся оболочку непрерывнолитой заготовки. В работе [6] установлено влияние НВ на свойства шлака в кристаллизаторе, образующегося после взаимодействия шлакообразующих смесей (ШОС) с металлом. Ассимилированные шлаком включения, всплывающие на поверхность мениска в большом количестве, способны оказывать неблагоприятное воздействие на физические свойства шлакового расплава, затекающего в зазор между заготовкой и плитами кристаллизатора, способствуя нарушению свойств смазки и теплофизических параметров шлакового гарниссажа, образованию дефектов оболочки непрерывнолитого слитка, а также подвисаний и прорывов.

Основная цель данной работы – анализ источников загрязнения непрерывнолитой стали НВ, уточнение механизма распределения их между металлом и шлаком, оценка влияния на дефектообразование, возникновение подвисаний и прорывов, а также выход годной стали.

Механизм проявления и развития дефектообразования, связанного с НВ, в значительной степени определяется их перемещением и финишным положением в металле или шлаке на этапе перехода фаз из жидкого состояния к твёрдому, что может быть представлено в виде схемы, приведённой на рис. 1.

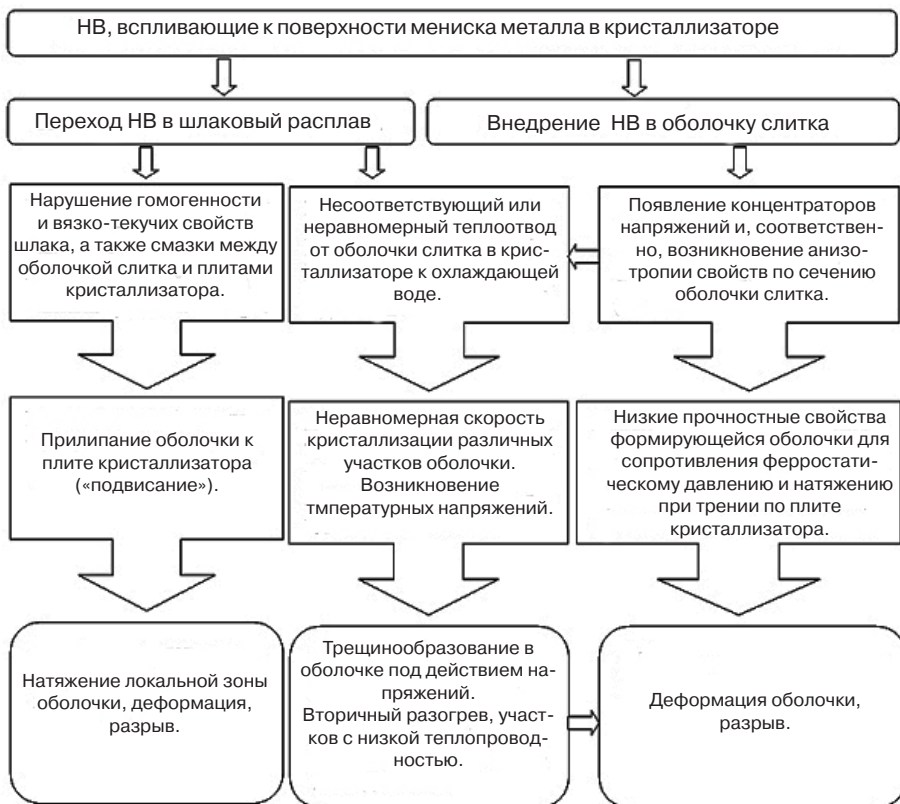


Рис. 1. Схема возможных перемещений и внедрений НВ в кристаллизаторе и влияние их на процесс формирования оболочки непрерывнолитой заготовки

На скорость перемещения НВ значительное влияние оказывает разность плотностей включения  $\rho_{НВ}$  и металла  $\rho_{Ме}$ , размер, геометрическая форма включений, а также их смачиваемость [1]. Кроме того, дополнительным фактором, влияющим на кинетическую энергию всплывающих НВ, является скорость и траектория восходящего в кристаллизаторе потока металла, транспортирующего включение.

Процесс ассимиляции всплывающих включений шлаком, зависит от их физико-химических свойств и в первую очередь от поверхностных явлений, происходящих на границе раздела «металл-шлак». Из-за различной степени смачивания отдельных включений металлом их поведение на границе раздела фаз будет существенно отличаться. Схема перехода НВ в шлак показана на рис. 2. Силы всплывания включений  $P_{всп}$ , действующие на тонкую поверхностную плёнку металла, будут вызывать возникновение усилия  $P_{\tau}$ , действующего против сил поверхностного натяжения ( $P_{пов}$ ) и стремящегося разорвать эту плёнку. Если  $P_{\tau} < P_{пов}$ , то включение не может прорвать плёнку и будет оставаться ниже уровня границы раздела. В противном случае происходит прорыв границы раздела и создаются условия для перехода включения в шлак [7]. Поведение включения, внедрённого в шлак, будет зависеть от разности плотности включения  $\rho_{НВ}$  и шлака  $\rho_{ш}$ , а также химической активности шлака по отношению к данному НВ.

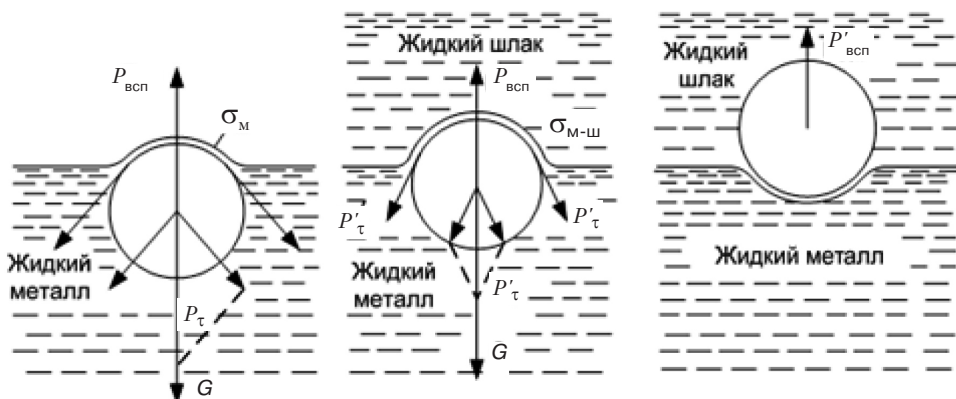


Рис. 2. Схема перехода НВ через границу раздела «металл-шлак»

Учитывая перечисленные факторы, можно представить основные возможные схемы внедрения НВ, всплывающих к поверхности жидкого мениска в кристаллизаторе, обусловленные различными физическими условиями (рис. 3).

Каждая из четырёх схем на рис. 3 представлена тремя фрагментами (вертикальной) последовательности процесса движения НВ в кристаллизаторе. В соответствии с рис. 3, а физические условия обеспечивают всплытие НВ к поверхности металла согласно разности плотности  $\rho_{НВ} < \rho_{Ме}$ , но при этом не достигается значение необходимого усилия  $P_{\tau}$  для разрыва поверхностной плёнки металла. Известно, что с повышением температуры величина поверхностного натяжения шлака уменьшается [7]. Распределение температуры поверхности мениска имеет нисходящий характер по мере приближения к водоохлаждаемым плитам, что особенно проявляется в районе углов. Эти участки способствуют замедлению перехода включений в шлак и задерживанию их в подповерхностной зоне. Проявление этого эффекта будет усиливаться по мере понижения перегрева стали над температурой ликвидуса, а также при слабой теплоизоляции поверхности мениска и повышенных колебаниях уровня металла в кристаллизаторе.

Для случая, представленного на рис. 3, б усилие всплывающих НВ  $P_{\tau} > P_{пов}$ . После перехода границы фаз плотность их оказывается большей, чем плотность шлакового

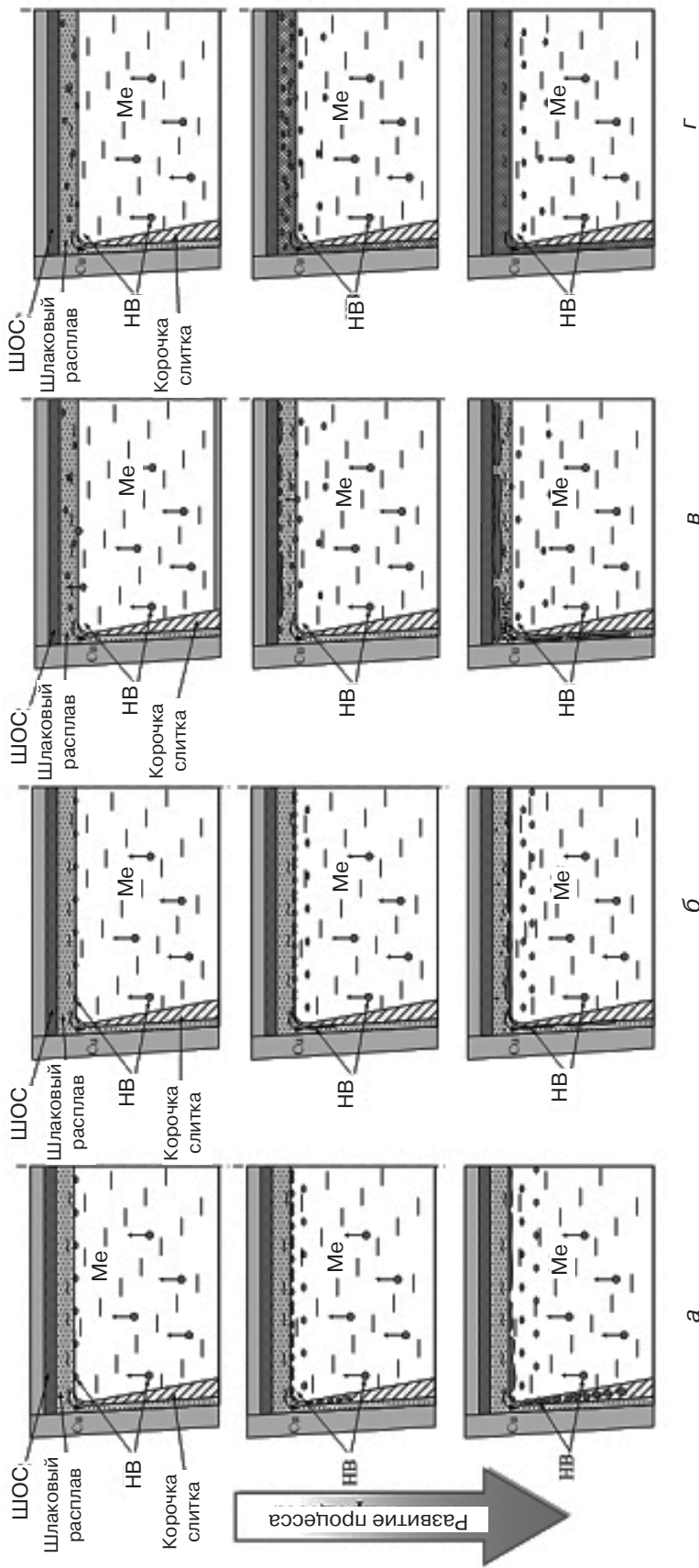


Рис. 3. Возможные схемы перемещения и распределения НВ при формировании оболочки слитка в кристаллизаторе в зависимости от свойств расплавов, НВ и контактирующих фаз: а – НВ задерживаются в подповерхностном слое ( $P_{\tau} < P_{\text{пов}}$ ); б – НВ проходят через плёнку металла и остаются на поверхности металла ( $P_{\tau} > P_{\text{пов}}$ ,  $P_{\text{НВ}} > P_{\text{ш}}$ ); в, г – НВ в шлаковом расплаве ( $P_{\tau} > P_{\text{пов}}$ ,  $P_{\text{НВ}} \leq P_{\text{ш}}$ )

расплава. В этих условиях включения концентрируются в виде прослойки между шлаком и металлом. Скопления НВ с более низкой вязкостью могут затруднять инфильтрацию рабочего шлакового расплава зазором между заготовкой и кристаллизатором. Вовлечённые шлаковым расплавом в зазор инородные включения значительно ухудшают рабочие характеристики теплоотвода и смазки. Кроме того, ухудшая условия инфильтрации расплава, НВ способствуют увеличению количества шлакового расплава на поверхности жидкого мениска в кристаллизаторе.

НВ, перешедшие границу фаз (рис. 3, в), имеют более низкую по сравнению со шлаковым расплавом плотность и не растворяются в нём, что повышает его гетерогенность. Занимая верхние слои шлакового расплава, включения могут концентрироваться в виде островков, снижая условия инфильтрации шлакового расплава, нарушая однородность условий теплообмена и смазки, а также способствуя увеличению толщины слоя шлака в кристаллизаторе.

При диффузии внедрившихся в шлак инородных включений (рис. 3, г) изменяется состав шлака и его физические свойства, а также минералогический состав гарниссажа и условия затекания шлака в зазор, что влияет на тепловое сопротивление и эффективность смазки. Связано это с тем, что компонентные составы ШОС могут обеспечивать необходимые свойства только в узких диапазонах своего химического состава. Наибольшую склонность к искажению состава имеют ШОС с низким удельным расходом, что связано с большим количеством НВ, всплывающих из разливаемой стали, на порцию свежей ШОС, присаживаемой в кристаллизатор.

Наиболее благоприятные условия для минимального отрицательного влияния НВ в кристаллизаторе, перешедших через межфазную границу, достигаются правильным подбором состава ШОС, который обеспечивает выравнивание скорости диффузии включений и их ассимиляции [6].

Нарушение процесса формирования оболочки заготовки в кристаллизаторе до её разрушения (прорыва) может быть вызвано следующими факторами:

- Прилипание локального участка оболочки заготовки к стенке кристаллизатора (подвисание), вызванное дефицитом смазочного материала между слитком и медной стенкой [8]. Сопутствовать данному нарушению будут процессы, представленные на рис. 3, б-г. Дополнительной причиной дефицита смазки может быть высокая газонасыщенность разливаемой стали. Процесс выделения газа через поверхность оболочки слитка препятствует равномерному затеканию шлака в зазор с необходимым по технологии расходом и формированию сплошного гарниссажа. Прорывы, возникшие по причине прилипания участка оболочки к плите кристаллизатора, всегда сопровождаются искажением следов качания и деформацией «чулка». В графическом отображении программ диагностики и слежения за состоянием процесса разлива накануне прорыва наблюдается резкое увеличение усилий вытягивания слитка, трения и теплоотвода в кристаллизаторе.

- Неблагоприятные условия теплоотвода в кристаллизаторе для конкретной марки стали, вызванные несоответствующим минералогическим составом шлакового гарниссажа и его физическими свойствами. Наличие кристаллической фазы (куспидина) в составе гарниссажа связано с химическим составом шлакового расплава [9], который может изменяться внедряющимися в него включениями. Указанные обстоятельства могут вызвать несоответствующую и неравномерную скорость первичной кристаллизации слитка, получение тонкой и непрочной оболочки, либо её растрескивание. Момент образования трещины в кристаллизаторе практически во всех случаях сопровождается «пиком» трения по причине резкого изменения периметра поперечного сечения формирующейся оболочки.

- Внедрение конгломерата в формирующуюся оболочку и образование на локальном участке аномальной корочки, подверженной разрушению – «шлаковому» прорыву по причине низкого теплоотвода и прочностных свойств в данной неодно-

родной зоне [4]. Следует отметить, что снижение скорости инфильтрации шлакового расплава зазором между заготовкой и кристаллизатором во всех случаях, представленных на рис. 3, будет способствовать дальнейшей концентрации НВ на единицу металла и шлака в поверхностной зоне мениска, повышая вероятность вовлечения включений в кристаллизирующуюся оболочку. При «шлаковых» прорывах деформация чулка практически отсутствует, а графики усилия и трения до прорыва остаются стабильными. Рост усилия трения наблюдается после истечения жидкой стали через повреждённую оболочку слитка под кристаллизатором и приваривания движущегося «чулка» к роликам подвески кристаллизатора.

Показателем стабильности инфильтрации шлака зазором между плитой кристаллизатора и заготовкой при постоянных условиях разливки является удельный расход ШОС. Так, на слябовых МНЛЗ ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) выявлено, что многим случаям прорывов под кристаллизатором сопутствует постепенное развитие различных дефектов при формировании оболочки. К ним можно отнести искажение следов качания, образование трещин, наплывов, микропрорывов, которые успевают «залечиваться» в кристаллизаторе (рис. 4) до момента, при котором возникающие в оболочке напряжения не достигают предельных значений допустимой деформации. В таких случаях перед прорывом наблюдается снижение удельного расхода ШОС на 10-30 %.



Рис. 4. Фото узкой грани сляба с участками «залечившихся» микропрорывов

Исследования, выполненные в работе [10], указывают на взаимосвязь некоторых аварийных ситуаций, определяемых системой раннего обнаружения прорывов «Mold Expert», с изменением состава шлака в кристаллизаторе в начале и по окончании разливки плавки. Источники шлаковых включений такие, как шлак сталеразливочного и промежуточного ковша при непрерывной разливке, имеют условно постоянные периоды влияния на процесс интенсивного проникновения НВ в кристаллизатор. Это периоды окончания и начала разливки плавки из сталеразливочного ковша, а также разливка с пониженным уровнем металла в промежуточном ковше. Изменение состава шлака промежуточного ковша может быть вызвано проникновением ковшевого шлака по причине возникновения эффекта воронкообразования при истечении последних порций металла из сталеразливочного ковша, а также стартовыми засыпками при открытии следующей плавки. При пониженном уровне металла в промежуточном ковше, особенно при открытии следующей плавки, возможно вовлечение частичек ковшевого шлака и шлака из промежуточного ковша в кристаллизатор, что приводит к изменению физико-химических свойств находящейся на его поверхности жидкой ШОС.

Для уточнения выдвинутого предположения в течение плавки, разлитой на МНЛЗ с постоянной температурой и скоростью под ШОС определенной марки, из кристаллизатора было отобрано пять проб шлака. Анализ проб показал, что наиболее существенные колебания в различные периоды плавки характерны содержанию в шлаке кристаллизатора глинозёма (рис. 5).

Установлено, что максимальное содержание глинозёма в шлаке кристаллизатора приходится на начало и окончание разливки плавки, а минимальное – приблизительно в середине. Данные диаграммы подтверждают экзогенное происхождение внедрившихся глинозёмистых включений. Источником этих включений может быть

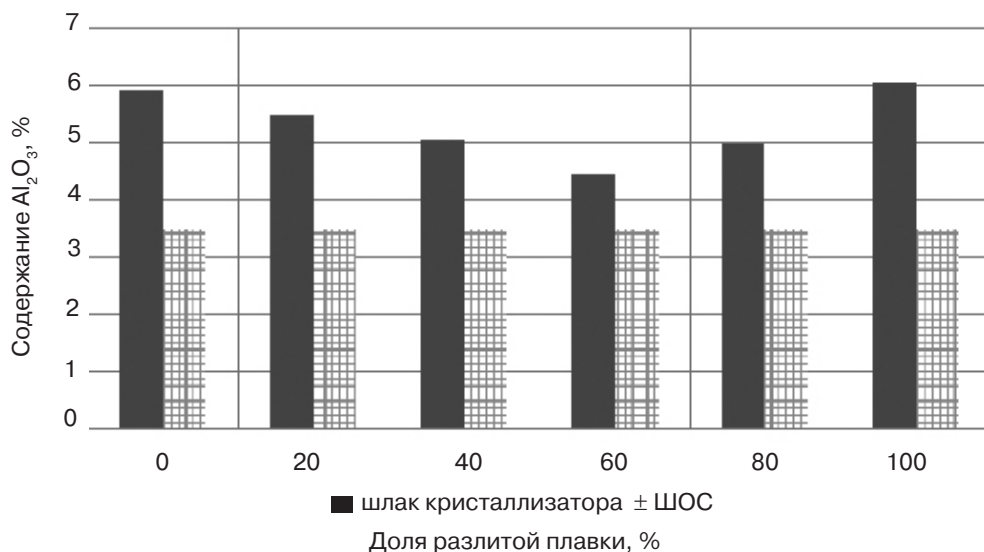


Рис. 5. Изменение содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлаке кристаллизатора по ходу разливки

ковшовый шлак, имеющий в своём составе 15-25 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следует обратить внимание, что прирост глинозёма во второй половине плавки происходит постепенно. По нашему мнению, этот факт объясняется наличием в разливаемом из сталеразливочного ковша металле промежуточной эмульсионной зоны, насыщенной медленно всплывающими НВ, концентрация которых постепенно увеличивается по мере приближения к границе раздела фаз металл-шлак.

В отличие от сферической формы жидких НВ сложная геометрия осаждённых твёрдых включений способствует сопротивлению перемещения их в металлическом расплаве. Включения могут иметь дендритообразную форму с многочисленными вершинами, коралловидную [1, 11] и коническую [12]. При этом процесс столкновения твёрдых соседних включений также будет способствовать дальнейшему снижению энергии и скорости всплытия, а в некоторых случаях – сцеплению их между собой. Формирующаяся таким образом промежуточная межфазная сетка (шлакометаллическая эмульсия) значительно влияет на условия перемещения включений к границе раздела металл-шлак для их ассимиляции. Именно поэтому в практике разливки низкокремнистых марок сталей часто наблюдается снижение пропускной способности металлопроводки на участках сталеразливочный-промежуточный ковш во второй половине плавки, а также промежуточный ковш-кристаллизатор в конце и начале следующей плавки.

Заращение сталеразливочного канала ковша происходит и в полости ковшового стакана, где контакт с атмосферой исключён, что также подтверждает предположение о постепенном повышении концентрации включений в металле по мере окончания разливки стали и приближении к шлаковой фазе вплоть до возникновения эффекта воронкообразования и ещё более интенсивного заращения. Исследования в условиях ПАО «АМК» показывают, что после разливки плавки низкокремнистых марок с нарушением истечения металла из сталеразливочного ковша шлакометаллический остаток, кантуемый в шлаковые чаши, имеет большую долю металла по сравнению с остатками плавки, разлитых без заращения металлопроводки.

Одним из способов снижения интенсивности эффекта воронкообразования и количества включений в металлическом остатке плавки является увеличение высоты расплава, находящегося в ковше, за счёт изменения схемы футеровки дна сталеразливочного ковша (рис. 6), что обеспечивает в конце разливки уменьшение площади взаимодействия металла и шлака [13, 14].

Внедрение новой схемы футеровки днища сталеразливочных ковшей в условиях

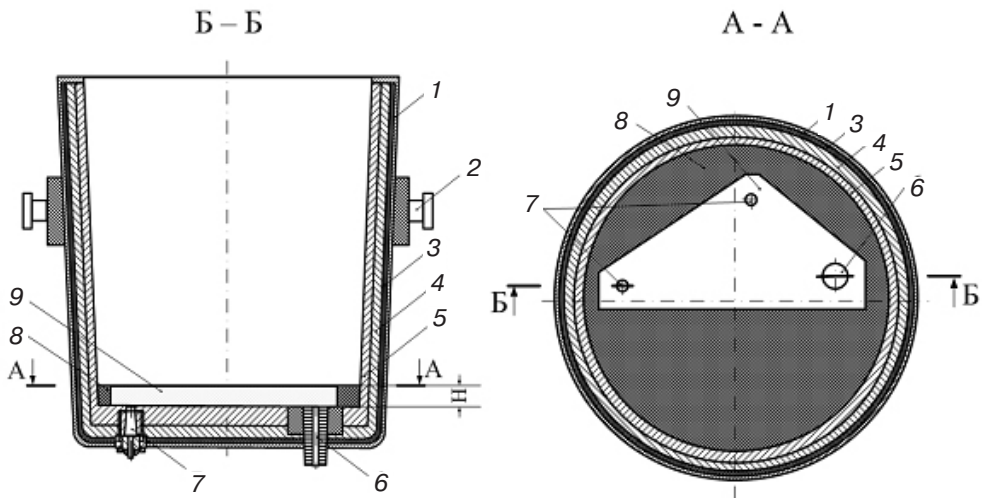


Рис. 6. Схема сталеразливочного ковша с изменённой конструкцией футеровки дна (продольное сечение Б-Б, поперечное А-А): 1 – металлический корпус (броня), 2 – цапфы; 3-5 – слои огнеупорной футеровки соответственно: изоляционный, арматурный, рабочий; 6 – сталеразливочный стакан с шибберным затвором, 7 – аргонные пробки; 8 – выступ на футерованном дне из огнеупорного бетона, 9 – шаблон

ПАО «АМК» позволило получить значительный экономический эффект, обусловленный увеличением выхода более чистой по НВ стали и снижением шлакометаллического остатка. Кроме того, отмечено снижение количества аварийных ситуаций при непрерывной разливке, связанных с нарушением физико-химических свойств шлака на поверхности стального мениска в кристаллизаторе в периоды начала и окончания разливки плавки из сталеразливочного ковша.

### Выводы

- Сформулированы и обоснованы основные схемы перемещения и внедрения НВ в металл и шлак кристаллизатора. Установлена взаимосвязь между удельным расходом шлакообразующих смесей и их физико-химическими и рафинирующими свойствами.
- Определены основные причины и практические признаки образования прорывов оболочки непрерывнолитой заготовки под кристаллизатором. Показано, что прилипание локального участка оболочки заготовки к стенке кристаллизатора (подвисяние) обуславливается дефицитом смазочного материала между слитком и медной плитой. Также возможные прорывы оболочки следует связывать с неблагоприятными условиями отвода тепла в кристаллизаторе, вызванные несоответствующим минералогическим составом шлакового гарниссажа и его физическими свойствами.
- На основании проведённых исследований динамики изменения состава шлака в кристаллизаторе получено подтверждение о значительном влиянии на его физико-химические свойства шлаковых включений различного происхождения, в том числе ковшевого шлака и продуктов раскисления в различные периоды разливки плавки.
- Предложен способ, позволяющий повысить чистоту разливаемой стали по НВ, снизить дефектообразование и аварийность процесса непрерывной разливки по прорывам, а также увеличить выход годной стали за счёт уменьшения шлакометаллического остатка в сталеразливочном ковше.
- В ходе дальнейших исследований предполагается разработка технологических рекомендаций, позволяющих управлять физико-химическими свойствами жидкой ШОС в кристаллизаторе за счёт присадки определённых компонентов для компенсации изменения её технологических характеристик, что вызвано попаданием в шлак кристаллизатора НВ экзо- и эндогенного происхождения.





### Список литературы

1. *Ефимов В. А.* Технология современной металлургии / В. А. Ефимов. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Процессы непрерывной разливки: Монография / А. Н. Смирнов, А. А. Минаев, С. В. Момот, Ю. Н. Белобородов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
3. *Дюдкин Д. А.* Непрерывная разливки металла / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, А. Н. Смирнов – М.: Теплотехник, 2009. – Т. 4. – 528 с.
4. Особенности технологии производства заготовок из низкоуглеродистой стали на сортовой МНЛЗ / С. А. Ботников, Н. Н. Кузькина, И. С. Мурзин, Г. Г. Михайлов, О. В. // Металлург № 7. – С. 59-62.
5. Re-start Technology for Reducing Sticking-type Breekout in Thin Slab Caster / Chang-Ho MOON, Duk Man LEE, Suk-Chun MOON. Hae-Doo PARK // ISIJ International, Vol. 48 (2008). № 1. – P. 48-57.
6. *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 – Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – Вып. 38. – 415 с.
7. Casting Volume / Editor A.W.Cramb. – Pittsburgh, PA: The AISE Steel Foundation, 2003. – 886 p.
8. *Смирнов А. Н.* Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан // Донецк: Цифровая типография, 2011. – 482 с.
9. *Däcker C.-Å.* The history of mould slag films downwards the mould and how it affects heat flux and shell growth in continuous casting of steels / C.-å. Däcker, A. Salwén, P. Andersson, C. Eggertsson // Materials & Process Development Department, Swerea KIMAB Box 55970, SE-102 16 Stockholm, SWEDEN.
10. *Смирнов А. Н.* Некоторые аспекты возникновения прилипаний и прорывов корочки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. Н. Максаев // Электрометаллургия. – 2013. – № 9. – С.13-21.
11. *Kaushik P.* Inclusion Characterization: A Tool for Measurement of Steel Cleanliness and Process Control / P. Kaushik, H. Pielet, H. Yin // Iron & Steel Technology. – 2009. – № 11. – P. 82-99.
12. Снижение количества шлака в ковше при выпуске плавки из конвертера / Л. М. Учитель, И. Н. Зигало, Е. Н. Пустовой, Ю. Ф. Брагинец, Ю. Н. Грищенко // Сталь. – 1991. – № 4. – С. 27-28.
13. Патент № 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 // заявник та патентовласник ДонДТУ. – № и 201301332; заявл. 04.02.2013; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.
14. Усовершенствование конструкции футеровки днища сталеразливочного ковша для повышения качества и выхода годной непрерывнолитой стали / С. В. Куберский, Е. Н. Максаев, С. В. Семирягин, А. В. Головчанский // Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях: Сб. научн. тр. / Под ред. проф., д-р. техн. наук А. Н. Смирнова. – Донецк: «НОУЛИДЖ», 2013. – С. 99-104.

Поступила 25.02.2015