

К. т. н. Л. М. Аксельрод (✉), к. т. н. И. В. Кушнерев, С. В. Сухарев,
к. т. н. А. В. Заболотский

ООО «Группа «Магнезит», Москва, Россия

УДК 666.76:669.18

ПРОИЗВОДСТВО ЧИСТОЙ СТАЛИ И СОВРЕМЕННЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Приведен обзор механизмов образования неметаллических включений с участием огнеупоров. Рассмотрены способы управления содержанием неметаллических включений и газов в стальном расплаве с использованием функциональных элементов. Представлена современная технология разливки чистой стали с использованием газоплотного шиберного затвора. Показана эффективность применения сухих смесей для формирования футеровки промежуточного ковша МНЛЗ при производстве флокеночувствительных сталей.

Ключевые слова: огнеупоры, чистая сталь, неметаллические включения (НВ), газы в стали.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества металлопродукции требует всестороннего анализа технологии производства. Одним из аспектов производства стальной заготовки является взаимодействие стального расплава с огнеупорной футеровкой агрегатов выплавки, обработки и разливки стали. Роль огнеупоров расширяется благодаря возможностям применения функциональной керамики, оказывающей активное воздействие на поведение стали на этапах производства.

ПОНЯТИЕ «ЧИСТАЯ СТАЛЬ»

Понятие «чистая сталь» возникло в связи с выходом производителей металлопродукции на новые рубежи, подразумевающие исчерпание резервов повышения уровня служебных характеристик изделий из стали без учета влияния на свойства металла ультранизких концентраций серы, фосфора, растворенных газов и неметаллических включений (НВ). Требования, предъявляемые к высококачественным маркам стали, постоянно возрастают и обобщенно могут быть представлены следующим образом.

1. Влияние НВ и газов на свойства стали

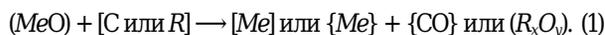
В общем случае НВ влияют на механические свойства готовой продукции за счет формирования в материале структурной неоднородности. В результате при возникновении нагрузки появляются нескомпенсированные напряжения, приводящие к преждевременному износу и разрушению изделий. Кроме того, могут возникать различного рода видимые дефекты. Коррозионные свойства стали также могут быть подвержены влиянию НВ

в случае эксплуатации продукции в коррозионно-активных средах, характерных, в частности, для насосно-компрессорных труб [1] и магистральных трубопроводов [2]. Превышение допустимого содержания водорода и азота приводит к таким явлениям, как образование флокенов и старение.

2. Формирование НВ

Неметаллические включения в стали в общем случае классифицируются по источнику возникновения как экзогенные и эндогенные. Экзогенными могут быть шлаковые включения или частицы футеровки металлургических агрегатов. Эндогенные включения в основном образуются в результате связывания в расплаве избыточного растворенного кислорода путем введения элементов-раскислителей. Кроме того, эндогенные включения могут представлять собой продукты взаимодействия футеровки с металлическим и шлаковым расплавами, а также являться результатом протекания реакций в объеме футеровки с выделением соединений, участвующих в образовании неметаллической фазы в объеме расплава.

Исследования показывают [2, 5–12], что в объеме огнеупоров возможно протекание восстановления металлов из оксидов углеродом, а также другими химическими элементами с высоким сродством к кислороду из расплава. Восстановлению углеродом способствует проведение обработки стали в вакууматорах камерного типа. В общем виде реакцию можно представить следующим образом:



В дальнейшем восстановленный элемент может переходить в сталь, что наблюдается в лабораторных [6] и промышленных [9] экспериментах, а затем окисляться до оксида. Отмечается также увеличение содержания магния в пробах металла [13].

Химический состав включений, предположительно сформировавшихся с участием магния из



Л. М. Аксельрод
E-mail: lakselrod@magnezit.com

футеровки (см. таблицу, рис. 1), в соответствии с диаграммой состояния (рис. 2) позволяет отнести их к твердым растворам магнезиальной шпинели в смеси с корундом. Такие включения пребывают в твердом состоянии при температурах выплавки и внепечной обработки стали и являются трудно деформируемыми в процессе обработки давлением, что негативно сказывается на служебных свойствах металлопродукции.

При наличии в огнеупоре легковосстановимых комплексных соединений возможно образование шпинели, например путем восстановления алюмином кремния из форстерита в соответствии с реакцией [9]:



Косвенным подтверждением протекания этой реакции является возникновение локаль-

Состав неметаллических включений на основе магнезиальной шпинели

Оксид	Содержание, мас. %	
	а	б
MgO	10,63	15,74
Al ₂ O ₃	79,97	60,39
SiO ₂	0,23	1,31
CaO	2,63	10,16
MnO	4,89	1,36
FeO	1,66	3,56

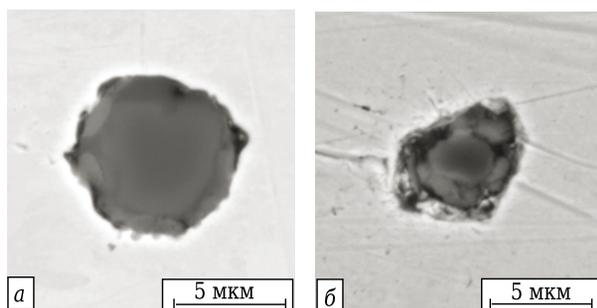


Рис. 1. Неметаллические включения магнезиальной шпинели в литом металле

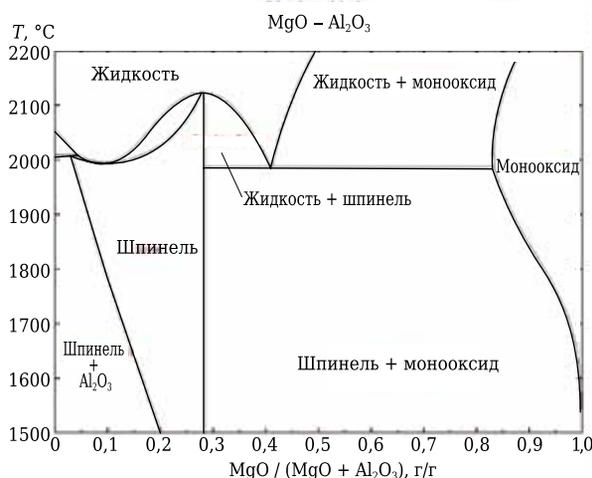


Рис. 2. Фрагмент диаграммы состояния MgO–Al₂O₃, рассчитанный в FactSage™ 7.0

ного повышения концентрации кремния на границе с футеровкой, наблюдаемое в промышленном эксперименте [9].

Исследования [1, 2, 5–12] показывают возможность образования магнезиальной шпинели в результате непосредственного взаимодействия растворенного алюминия с оксидом магния или его парами, образовавшимися в процессе восстановления углеродом. При формировании соединений в соответствии с реакциями (1) и (2) на границе раздела сталь – огнеупор в результате интенсивного движения металлического расплава возможен отрыв комплексной фазы, приводящий к загрязнению стали. Аналогично отмечено [14], что в глиноземистых огнеупорах с высоким содержанием SiO₂ на основе андалузита или боксита при контакте с алюминием, растворенным в стали, происходит восстановление кремния с образованием Al₂O₃. В результате происходит загрязнение стали корундовыми включениями. Это может быть одной из движущих сил постепенного замещения на предприятиях Европы андалузит- или бокситсодержащих огнеупоров на алюмопериклазовые или периклазоуглеродистые.

Изучение взаимодействия металлического расплава с материалом футеровки промежуточных ковшей МНЛЗ [15] показывает наличие у магнезиальной футеровки более высокого окислительного потенциала по сравнению с корундовой по причине более высокого количества легковосстановимых примесей. С другой стороны, например, в металлокорде особое внимание уделяется недеформируемым НВ на основе оксида алюминия, в результате чего на производстве предпочтение отдается футеровкам и функциональным огнеупорным элементам на основе оксида магния. Таким образом, выбор футеровки с точки зрения формирования оптимальных по составу и структуре НВ определяется их влиянием на свойства готовой продукции.

3. Управление содержанием НВ и газов на различных этапах металлургического передела

Выплавка

На этапе выплавки происходит загрязнение стали преимущественно экзогенными НВ: сколы футеровки, фрагменты шлакового гарнисажа, образовавшегося на футеровке, непосредственно частицы шлака. Включения экзогенной природы, как правило, являются крупными, что облегчает их массоперенос во время последующей внепечной обработки из объема металлического расплава к границе раздела фаз металл – шлак за счет принудительного перемешивания. Образование эндогенных включений связано с выплавкой стали опосредованно через количество окисленного шлака, поступающего в сталеразливочный ковш и являющегося источником кислорода для окси-

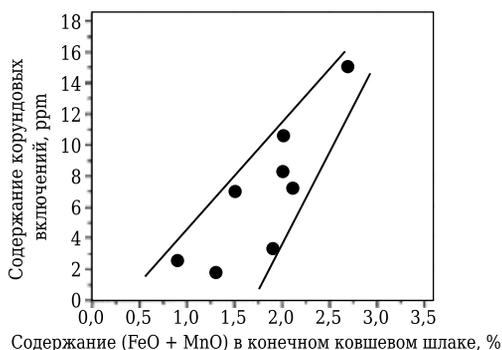


Рис. 3. Зависимость содержания корундовых включений в промежуточном ковше от окисленности шлака в сталеразливочном ковше [1]

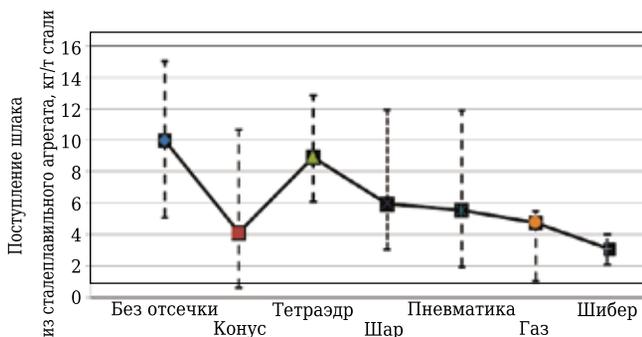


Рис. 4. Сравнение эффективности различных систем отсечки шлака [19]



Рис. 5. Конус отсечки шлака

дов, формирующихся на следующих этапах сталеплавильного передела (рис. 3).

Влияние шлака на состав НВ подтверждается исследованиями с применением SrCO₃ [16], добавленного в шлак установки АКР при производстве нержавеющей стали. Результаты показали наличие элемента-индикатора Sr во включениях обеих размерных групп (20–50 и >50 мкм), обнаруженных при изучении проб литой заготовки. Факторами, определяющими количество печного шлака, попадающего в ковш, являются состояние футерованного огнеупорами выпускного отверстия сталеплавильного агрегата и эффективность отсечки

шлака на выпуске. Использование различных систем отсечки шлака позволяет существенно влиять на количество окисленного шлака, поступающего в сталеразливочный ковш (рис. 4). Эффективной отсечки шлака можно достичь с применением достаточно простых устройств, таких как, например, конус из огнеупорного бетона (рис. 5).

Внепечная обработка стали

Интенсивный износ футеровки как источник НВ обычно обусловлен неверным выбором состава огнеупоров или шлакового режима ведения процесса рафинирования стали в ковше. Исследования с использованием термохимического моделирования в пакете программ FactSage 7.0 показывают, что при внепечной обработке стали, раскисленной алюминием, в ковше с футеровкой на основе различных оксидов могут быть получены различные по составу НВ (рис. 6). Расчеты термохимических равновесий были выполнены в модуле Equilib с использованием баз данных FToxid и FTmisc, а изотермический разрез тройной диаграммы системы CaO–MgO–Al₂O₃ рассчитан в модуле Phase Diagram. В соответствии с результатами расчетов только в футеровке на основе доломита включения будут жидкими. Расчетный состав данной фазы позволяет отнести включения к алюминатам кальция. Для футеровки на основе глинозема и периклаза включения будут твердыми и представлять собой по составу в основном корунд и магнезиальную шпинель соответственно.

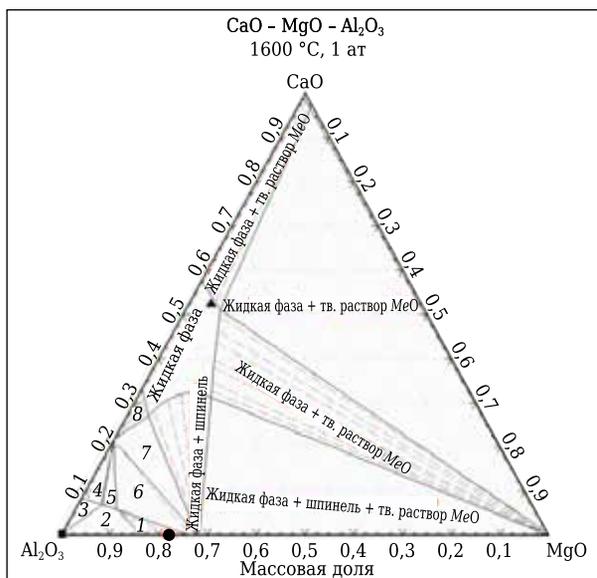


Рис. 6. Неметаллические включения в зависимости от состава футеровки на диаграмме состояния системы CaO–MgO–Al₂O₃, смоделированной в FactSage 7.0: MgO (●) — периклазовая; Al₂O₃ (■) — высокоглиноземистая; CaO–MgO (▲) — доломитовая; 1 — CaMg₂Al₁₆O₂₇ + шпинель; 2 — корунд + CaMg₂Al₁₆O₂₇ + шпинель; 3 — корунд + CaMg₂Al₁₆O₂₇ + CaAl₂O₁₉; 4 — CaMg₂Al₁₆O₂₇ + CaAl₂O₁₉ + CaAl₄O₇; 5 — Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆ + CaMg₂Al₁₆O₂₇ + CaAl₄O₇; 6 — CaMg₂Al₁₆O₂₇ + CaAl₄O₇ + шпинель; 7 — CaAl₄O₇ + шпинель + жидкая фаза; 8 — CaAl₄O₇ + жидкая фаза

Повышение чистоты стали на этапе внепечной обработки — задача таких функциональных огнеупорных элементов, как продувочные устройства, изготавливаемые обычно из огнеупорных бетонов. Через продувочные устройства осуществляется управляемая обработка расплава инертным газом. При этом в случае интенсивной обработки возможно попадание в сталь как частиц шлака, так и продуктов его взаимодействия с футеровкой. Поэтому обработку стали инертным газом при-

нято осуществлять в мягком режиме. Удаление продуктов раскисления благодаря рациональной продувке в процессе внепечной обработки может достигать 85 % [3]. Что касается газов в стали, продувка инертным газом при обработке металла в вакууматорах камерного типа позволяет улучшить удаление водорода за счет активизации массопереноса в область расплава, подвергаемой дегазации.

Разливка

Исследования показывают, что загрязненность НВ в целом снижается в процессе обработки после выпуска стали из плавильного агрегата. Рассматривая общее содержание кислорода как косвенную оценку загрязненности стали оксидными включениями (рис. 7), можно видеть закономерную тенденцию к ее снижению. В некоторых случаях загрязненность стали, напротив, может существенно возрастать на этапе разливки (рис. 8). В этой связи управление содержанием неметаллической фазы в промежуточном ковше и кристаллизаторе приобретает особое значение.

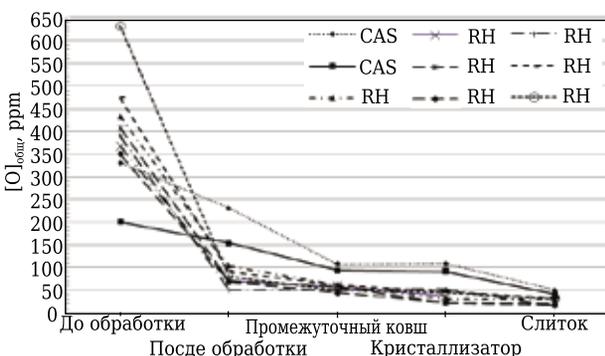


Рис. 7. Содержание общего кислорода в стали с различным видом внепечной обработки по этапам производства (по данным [21])

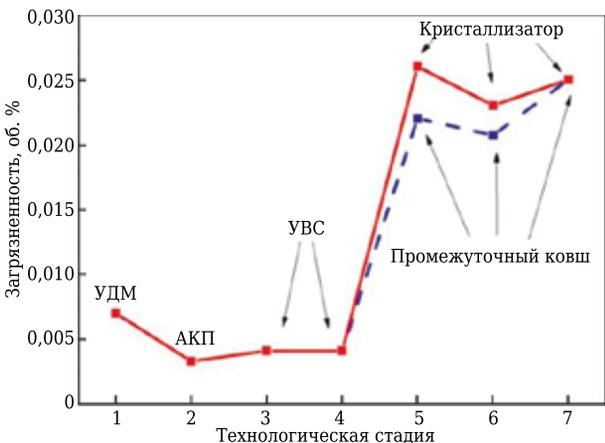


Рис. 8. Загрязненность стали НВ на различных этапах ее производства [22]

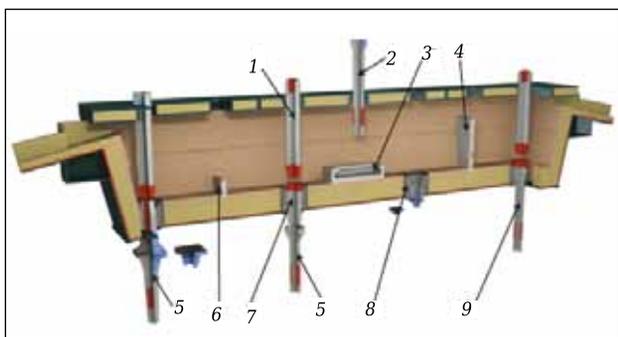


Рис. 9. Промежуточный ковш с функциональными огнеупорными элементами: 1 — стопор; 2 — защитная труба; 3 — металлоприемник; 4 — перегородка; 5 — погружаемый стакан; 6 — порог; 7 — стакан-дозатор; 8 — гнездовой блок; 9 — стакан-дозатор моноблок

Из факторов, влияющих на загрязнение стали включениями на данном этапе, можно выделить следующие:

- эжекция воздуха через механизм шиберного затвора;
- эжекция воздуха в истекающую струю металла или зазоры между огнеупорами, защищающими струю (труба для защиты струи металла, погружаемый стакан), и изделиями, формирующими струю при разливке (стакан-дозатор, стакан-коллектор);
- вид и состав рабочего слоя футеровки промежуточного ковша МНЛЗ, а также функциональных изделий изостатического прессования;
- качество покровного шлака промежуточного ковша и ШОС кристаллизатора;
- гидравлика потоков расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе.

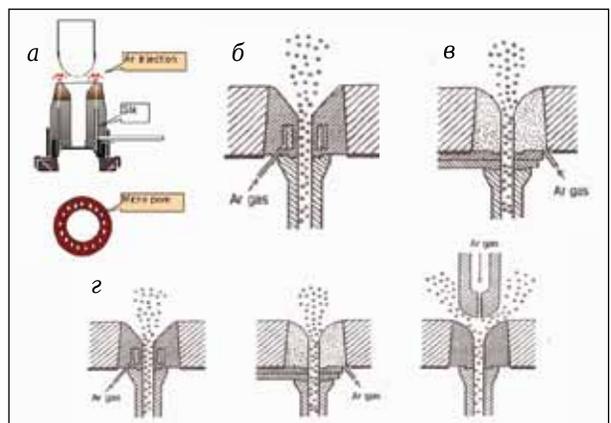


Рис. 10. Варианты организации подвода инертного газа в зону истечения металла из промежуточного ковша: а — микропористый стакан-дозатор [24]; б — пористая втулка; в — пористый стакан-дозатор; г — стопоры с подводом газа [25]

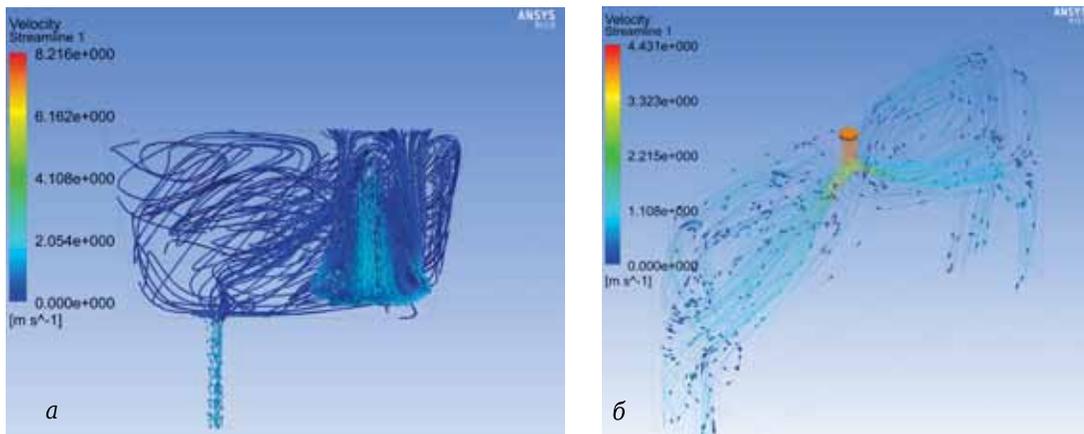


Рис. 11. Результаты моделирования истечения потоков: а — в промежуточный ковш; б — в кристаллизатор

Избыточное поступление газов в сталь на этапе разлива обусловлено главным образом контактом стали с атмосферным воздухом.

Среди мероприятий, связанных с огнеупорами и направленных на повышение чистоты стали, выделяют следующие:

1. Организация защиты струи металла функциональными изделиями и подвод аргона в критически важные зоны, а также использование функциональных элементов специального дизайна для формирования оптимальных потоков металла в промежуточном ковше и кристаллизаторе.

На рис. 9 показана обобщенная схема вариантов компоновки функциональных элементов, определяющих как движение потоков металла в промежуточном ковше, так и режим истечения металла из промежуточного ковша. Обдув критических зон инертным газом осуществляется, начиная со стыка труб защиты, стыкуемых со стаканом-коллектором шибберного затвора. Существуют варианты стаканов-дозаторов промежуточного ковша с подводом аргона в разливочный канал через внутренний пористый слой, обеспечивающий равномерное распределение инертного газа по длине канала, применение которых в некоторых случаях позволяет снизить загрязненность стали НВ [20]. Альтернативные варианты подвода аргона в зону истечения стали из промежуточного ковша показаны на рис. 10.

Проектирование дизайна функциональных элементов вместе с компьютерным моделированием истечения струи в промежуточный ковш и кристаллизатор (рис. 11) позволяет определить оптимальные условия для формирования потоков, увлекающих НВ из расплава в зону контакта с покровным шлаком или ШОС, и вместе с тем избежать попадания частиц шлака в сталь, что является критичным на этапе затвердевания в кристаллизаторе.

2. Разливка стали через специальный шибберный затвор.

Одним из вариантов технологии является трехплитный газоплотный шибберный затвор

модели FT3 GT компании «Knoellinger FLO-TEC GmbH» (рис. 12), предназначенный для разлива высокочистых марок стали [23, 24]. Шибберный затвор имеет закрытый корпус, в котором установлены специальные резинометаллические уплотнения, позволяющие поддерживать в затворе инертную атмосферу при условии подвода инертного газа. Таким образом, уменьшается подсос атмосферного воздуха и тем самым снижается содержание азота и кислорода в стали. Для обдува стыка со стаканом-коллектором затвор снабжен байонетом с форсункой для подвода защитного газа из внутренней полости шибберного затвора.

Представители одного из предприятий Германии, эксплуатирующих шибберный затвор FT3 GT, отмечают более чем двукратное снижение количества НВ в стали после перехода на разливку через этот тип затворов. Разливка стали на данном предприятии производится через сифон в изложницы, при этом в защитную трубу вводится инертный газ.

3. Установка в промежуточном ковше перегородок и металлоприемников.

Правильный выбор типа и места установки перегородок также позволяет снизить вихреобразование на поверхности металла и затягивание покровного шлака в объем расплава [4, 25, 26]. Перегородки специальной конструкции с отверстиями [22, рис. 13] могут способствовать

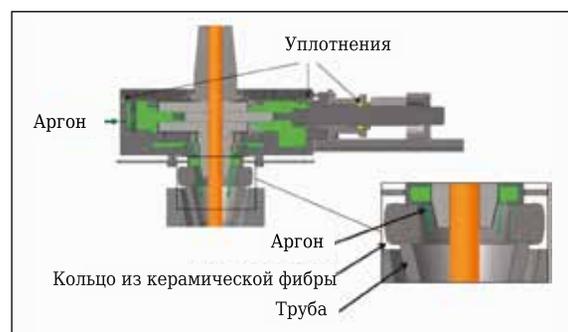


Рис. 12. Схема газоплотного шибберного затвора FT3 GT [27]

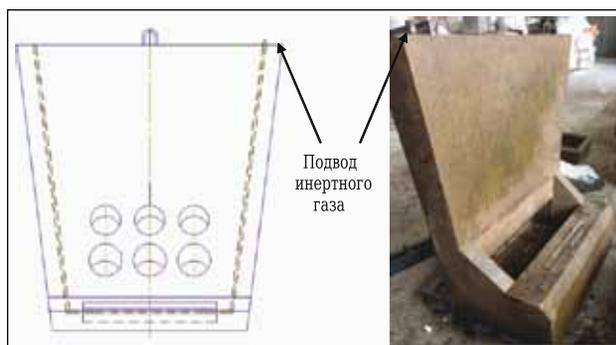


Рис. 13. Перегородка с отверстиями и вставкой для подвода инертного газа производства Группы «Магнезит»

улучшению локального перемешивания в застойных зонах и тем самым приводить к укрупнению включений и, следовательно, к их удалению.

Основная задача металлоприемных устройств, устанавливаемых в промежуточные ковши, — гашение турбулентности струи металла, попадающей из сталеразливочного ковша в промежуточный. Группа «Магнезит» имеет многолетний опыт производства и поставки потребителям металлоприемных устройств периклазового, корундового и муллитокорундового составов. Примеры их конфигурации показаны

на рис. 14. С 2013 г. данная продукция объединена под брендом РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®. Предлагаемые металлоприемные устройства позволяют снизить количество экзогенных НВ, переходящих в сталь из футеровки, за счет уменьшения износа огнеупоров приемной зоны промежуточного ковша, включая износ самого металлоприемного устройства. Одновременно увеличивается степень удаления НВ, уже содержащихся в жидкой стали на стадии начала разливки, за счет правильной организации движения потоков в промежуточном ковше. Критерием правильной организации потоков расплава в промежуточном ковше служит увеличение продолжительности пребывания каждой порции металла за счет увеличения длины пути от попадания из трубы защиты в приемную зону до истечения через стаканы-дозаторы в разливочных зонах промежуточного ковша.

Математическое и физическое моделирование позволяет прогнозировать гидродинамику расплава и тепловые поля в промежуточных ковшах с различными типами приемной зоны, позволяя в результате подбирать оптимальные условия удаления неметаллических включений для условий конкретного производства [27]. На рис. 15 показан пример реализованного специ-

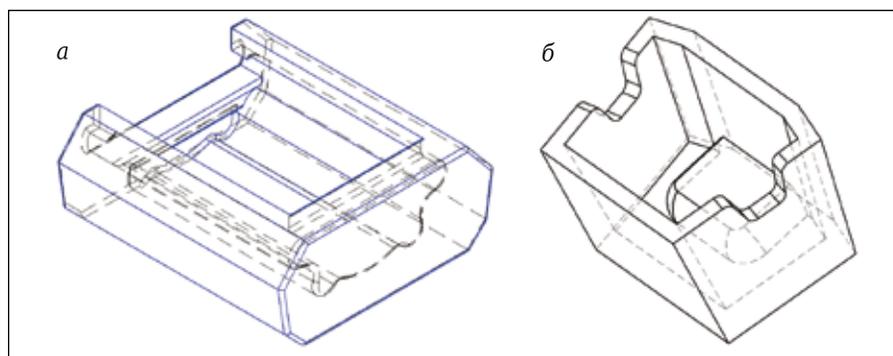


Рис. 14. Примеры металлоприемных конструкций промежуточного ковша, поставляемых Группой «Магнезит» под брендом РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®: *a* — металлоприемник; *б* — металлоприемный колодец

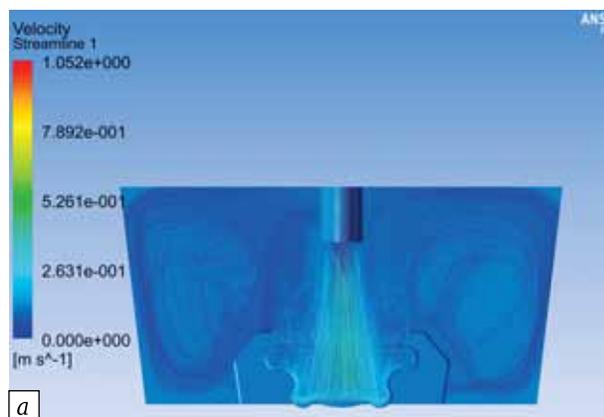


Рис. 15. Результаты моделирования формирования потоков в промежуточном ковше с установленным металлоприемником, имеющим волнистую внутреннюю поверхность (см. рис. 14)

алистами Группы «Магнезит» моделирования формирования потоков при использовании металлоприемников РЕЙНСТРИМ/REINSTREAM®. Полученные результаты подтверждают эффективность гашения турбулентности струи и организации массопереноса в пространстве на границе металл – шлак.

4. Устанoвка в днище промежуточного ковша огнеупорных продувочных элементов.

Продувочные элементы могут быть как независимыми (отдельно стоящими), так и интегрированными в перегородки [28, 29] или «пороги» [30]. Существуют варианты применения кольцевых трубчатых продувочных блоков, устанавливаемых вместо гнездовых блоков стаканов-дозаторов в промежуточных ковшах [31, 32], изделий с пористой вставкой [22] или интеграция блоков подвода инертного газа в футеровку промежуточного ковша. При этом последнее техническое решение является сложным в реализации и результаты использования чувствительны к конструкции промежуточного ковша.

5. Керамические фильтры для осаждения включений.

Фильтрация расплава через керамические фильтры является одной из возможностей дополнительного повышения чистоты стали на этапе непрерывной разливки. Фильтры могут быть изготовлены на основе вспененных материалов или в виде сеток из керамических колец

[33]. Кроме того, исследователи изучают влияние на эффективность процесса фильтрации различных видов функциональных покрытий. В частности, в работе [34] на фильтры на основе вспененного корундографита наносили частицы чистого корунда и суспензии, состоящей из многостенных углеродных нанотрубок и Carbores® P. В результате был отмечен потенциал многостенных углеродных нанотрубок в качестве активатора процесса формирования слоя отложений на поверхности фильтра.

Практическое применение фильтров на основе CaO [4] показало, что установка их в перегородки промежуточного ковша является достаточно эффективным способом снижения загрязненности стали включениями на основе корунда. Так, на заводе «Wusteel» количество включений снизилось на 15 %, а в кордовой канатке ОАО «БМЗ – УКХ «БМК» [35] существенно снизилась доля корундовых включений всех размерных групп; было отмечено полное отсутствие включений размерами более 5 мкм.

6. Применение сухих торкрет-масс.

На завершающем этапе производства стальной заготовки возможно возрастание содержания водорода в связи с поступлением остаточной влаги из материала футеровки промежуточного ковша. В этой связи целесообразно применять такое техническое решение, как формирование футеровки с использованием сухих

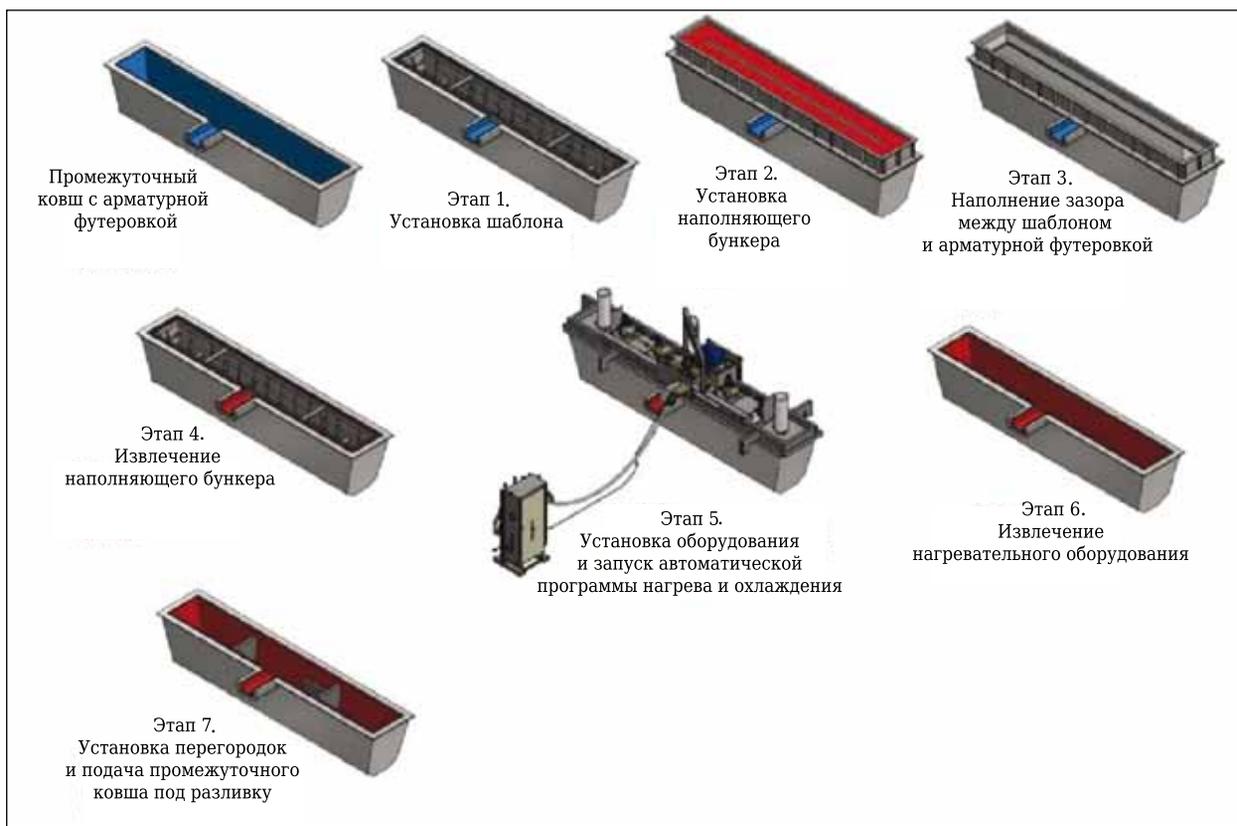


Рис. 16. Схема формирования футеровки путем спекания сухих огнеупорных масс

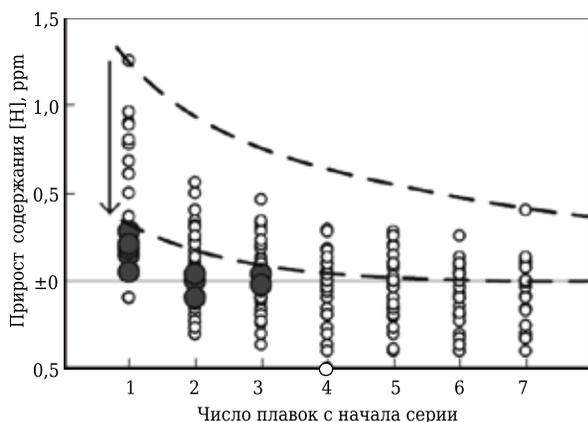


Рис. 17. Изменение содержания водорода в стали в промежуточном ковше [39]: ○ — мокрое торкретирование; ● — сухая масса

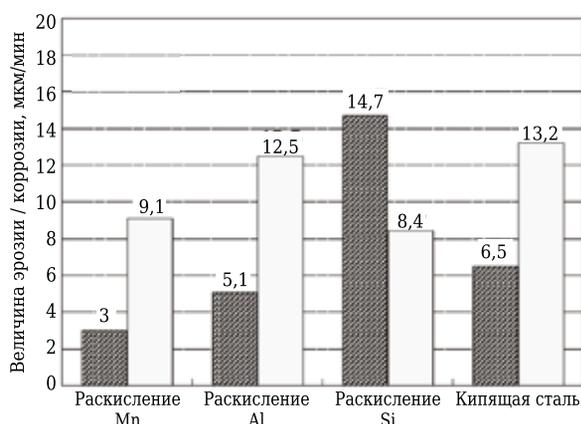


Рис. 18. Коррозионная стойкость изделий на основе MgO (■) и Al₂O₃ (□) [8]

торкрет-масс, засыпаемых между нагреваемым шаблоном и арматурным слоем футеровки промежуточного ковша [36] или между нагретым арматурным слоем футеровки и холодным корпусом шаблона (рис. 16).

Опыт показывает значимое снижение прироста содержания водорода в стали в случае перехода на футеровку на основе сухих масс (рис. 17).

Библиографический список

- Иоффе, А. В.** Коррозионно-механическое разрушение насосно-компрессорных труб из углеродистых и легированных сталей при эксплуатации в средах, содержащих сероводород / А. В. Иоффе, Т. В. Тетюева, М. А. Выбойщик [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 2012. — № 10. — С. 4–9.
- Зайцев, А. И.** Новые типы неблагоприятных неметаллических включений на основе MgO–Al₂O₃ и металлургические факторы, определяющие их содержание в металле. Часть 1 / А. И. Зайцев, А. Г. Родионова, Г. В. Семернин [и др.] // *Металлург*. — 2011. — № 2. — С. 50–55.
- Zhang, L.** State of the art in evaluation and control of steel cleanliness / L. Zhang, B. G. Thomas // *ISIJ Int.* — 2003. — Vol. 43, № 3. — P. 271–291.
- Lin, Y.** Roles and progress of refractories in clean steel production / Y. Lin // *China's Refractories*. — 2011. — Vol. 20, № 2. — P. 8–15.

Одновременно с этим в случае использования мокрых торкрет-масс важно регулировать режим сушки во избежание сохранения в футеровке влаги, являющейся источником водорода в процессе разлива [37].

7. Состав огнеупоров.

Несмотря на значительную роль конструкции и схемы применения функциональных элементов рациональный подбор их состава и футеровки промежуточного ковша [8, 9] сохраняет свое значение в управлении процессом производства чистой стали. Так, исследования показывают [7], что химическая устойчивость периклазоуглеродистых и корундографитовых изделий к стали различных марок в условиях интенсивного массопереноса, имитирующих разлива стали, существенно различается (рис. 18), что влияет на загрязнение экзогенными включениями.

Для снижения образования неметаллических отложений в канале погружаемых стаканов и повышения чистоты стали может быть использована концепция «безуглеродных» функциональных элементов [8]. В результате при общем сохранении уровня служебных свойств изделий становится невозможным протекание реакции восстановления щелочноземельных оксидов или диоксида кремния в материале стакана с образованием газообразных продуктов, способных окислить алюминий в расплаве на границе раздела стакан – сталь.

Результаты актуальных исследований [38, 39] подтверждают влияние на зарастание погружаемых стаканов углерода и демонстрируют эффективность применения новых безуглеродных изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство чистой стали неотъемлемо связано с огнеупорными материалами и изделиями, применяемыми на каждом этапе производства. Эффект от поступления неметаллической фазы в сталь, обусловленный различными видами износа огнеупоров, компенсируется значительной ролью функциональных элементов в управлении загрязненностью металлического расплава.

- Potschke, J.** Why is MgO–C refractory material applicable in steel metallurgy? / J. Potschke // *Refractories Worldforum*. — 2013. — № 2 (5). — P. 80–94.
- Clasen, S.** Experimental study to determine the reoxidation stability of refractory materials / S. Clasen, C. Dannert, L. Redecker [et al.] // *UNITECR 2015*. — Abstract-Number: 273.
- Sasaki, A.** Influence of molten steel on erosion resistance of MgO-Graphite material for continuous casting / A. Sasaki, S. Matsumoto, K. Morikawa, J. Yoshitomi // *UNITECR 2015*. — Abstract-Number: 324.
- Poirer, J.** A review: influence of refractories on steel quality / J. Poirer // *Metallurgical Research and Technology*. — 2015. — Vol. 112, № 410. — P. 1–20.
- Mantovani, M. C.** Interaction between molten steel and MgO-based tundish lining: a potential source of non-

- metallic inclusions / *M. C. Mantovani Jr., L. R. Moraes, E. F. Cabral* [et al.] // UNITECR 2011. — 31-E-5 — P. 199.
10. **Yan, P.** Interaction between steel and distinct gunning materials in the tundish / *P. Yan, M.-A. Van Ende, E. Zinngrebe* [et al.] // ISIJ Int. — 2014. — Vol. 54, № 11. — P. 2551–2558.
11. **Brabie, V.** Mechanism of reaction between refractory materials and aluminium deoxidized molten steel / *V. Brabie* // ISIJ Int. — 1996. — Vol. 36. — P. 109–112.
12. **Пирожкова, В. П.** Механизм образования включений магнезиальной шпинели / *В. П. Пирожкова, М. Ю. Яценко* // Сталь. — 2011. — № 3. — С. 24–27.
13. Dissolution behavior of Mg from MgO into molten steel deoxidized by Al. *A. Harada, G. Miyano, N. Maruoka* // ISIJ Int. — 2014. — Vol. 54, № 10. — P. 2230–2238.
14. **Buhr, A.** Steel industry in Germany — trends clean steel technology and refractory engineering / *A. Buhr, R. Bruckhaussen, R. Fahndrich* // Refractories Worldforum. — 2016. — № 1 (8). — P. 57–63.
15. **Yan, P.** Interaction between steel and distinct gunning materials in the tundish / *P. Yan, M.-A. Van Ende, E. Zinngrebe* [et al.] // ISIJ Int. — 2014. — Vol. 54, № 11. — P. 2551–2558.
16. **Hojo, M.** Oxide inclusion control in ladle and tundish for producing clean stainless steel / *M. Hojo, R. Nakao, T. Umezaki* [et al.] // ISIJ Int. — 1996. — Vol. 30. — P. 128–131.
17. **Tomas, M.** Feuerfestlösungen zur Verbesserung des Stahlreinheitsgrades / *M. Tomas, M. Kirschen, J. Rotsch* [et al.] // Stahl und Eisen. — 2012. — № 8. — S. 3–45.
18. **Zhang, L.** Inclusion Investigation during clean steel production at baosteel: ISS Tech 2003. Indianapolis, IN, USA, 27–30 апреля 2003 г. / *L. Zhang, B. G. Thomas* [et al.] // ISS-AIME, Warrendale, PA, 2003. — P. 141–156.
19. **Казаков, А. А.** Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали / *А. А. Казаков, П. В. Ковалев, С. В. Рябошук* [и др.] // Черные металлы. — 2014. — № 4. — С. 43–48.
20. **Божесков, А. Н.** Применение стаканов-дозаторов с продувкой аргоном для повышения уровня разливаемости сталей / *А. Н. Божесков, В. В. Казаков, А. А. Коростелев* [и др.] // Сталь. — 2015. — № 7. — С. 13–16.
21. **Yanwen, Y.** The influence of submerged entry nozzle and upper nozzle design on the flow character for the slab quality / *Y. Yanwen, Z. Yuxi, Z. Zhiming* // UNITECR 2015. — Abstract-Number: 183.
22. **Tassot, P.** Ways of improving steel quality in the tundish / *P. Tassot, N. Reichert* // Revue de Métallurgie. — 2010. — № 107. — P. 179–185.
23. **Hippenstiel, F.** Development of a gas-tight slide gate to reduce re-oxidation during steel casting / *F. Hippenstiel, R. Hellermann, N. Hofmann* [et al.] // 2nd ESTAD, 2015. — P. 615.
24. **Хеллерман, Р.** Герметичная шибберная система для снижения уровня поглощения кислорода при разливке стали / *Р. Хеллерман, Ф. Хиппенштиль, Н. Хофман* [и др.] // Черные металлы. — 2017. — № 1. — С. 29–32.
25. **Гущин, В. Н.** Технические решения по управлению потоками расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ / *В. Н. Гущин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев* // Металлург. — 2010. — № 9. — С. 45–47.
26. **Куклев, А. В.** Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / *А. В. Куклев, В. В. Туняков, Ю. М. Айзин* [и др.] // Металлург. — 2004. — № 4. — С. 47–49.
27. **Mangin, L.** Improvement of inclusions cleanliness by control of tundish steel flow-experimental and numerical approaches / *L. Mangin, A. Carré, F. Ruby-Meyer* [et al.] // 2nd ESTAD, 2015. — P. 350.
28. **Вдовин, К. Н.** Разработка рафинирующих устройств модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ / *К. Н. Вдовин* // Механическое оборудование металлургических заводов. — 2015. — № 1 (4). — С. 42–46.
29. **Ушаков, С. Н.** Технологические решения по управлению потоками металла в промежуточных ковшах МНЛЗ / *С. Н. Ушаков, О. А. Марочкин, К. Н. Вдовин* // Металлург. — 2010. — № 9. — С. 45–47.
30. **Найдек, В. Л.** Эффективные технические решения в современных технологиях рафинирования стали от неметаллических включений в промковшах МНЛЗ [Электронный ресурс] / *В. Л. Найдек, А. В. Ноговицин, Е. Ф. Дюк* [и др.] — 50 лет непрерывной разливке стали на Украине. — Донецк: [б.и.], 2010. — Режим доступа: <http://uas.su/conferences/2010/50letmnlz.php>, свободный.
31. **Смирнов, А. Н.** Рафинирование стали в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ при продувке аргоном через кольцевую пористую фурму / *А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко* [и др.] // Сталь. — 2013. — № 12. — С. 14–20.
32. **Смирнов, А. Н.** Рафинирование стали в шестиручьевом промежуточном ковше блюмовой МНЛЗ / *А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко* [и др.] // Бюл. Черная металлургия. — 2015. — № 12. — С. 46–53.
33. **Uemura, K.** Filtration Mechanism of Non-metallic Inclusions in Steel by Ceramic Loop Filter / *K. Uemura, M. Takahashi, S. Koyama, M. Nitta* // ISIJ Int. — 1992. — Vol. 32, № 1. — P. 150–156.
34. **Schmidt, A.** Experimental evaluation of the kinetics of inclusion deposition from steel melt on Al₂O₃-C filters with functional coatings / *A. Schmidt, E. Storti, S. Dudczig, C. G. Aneziris* // 59th International Colloquium on Refractories. — 2016. — P. 218–220.
35. **Красюк, О. П.** О влиянии периклазовых перегородок с кальциевыми фильтрами в промежуточном ковше на распределение неметаллических включений в кордовой катанке / *О. П. Красюк, И. А. Бондаренко, А. Н. Чичко* // Литье и металлургия. — 2009. — № 2 (51). — С. 159–163.
36. **Takashima, S.** Application of a dry coating technique for CC tundish / *S. Takashima, Y. Kubo, M. Ootsuka, H. Yamazoe* // UNITECR 2015. — Abstract-Number: 207.
37. **Бойченко, С. Б.** Причины повышения содержания водорода в флокочувствительных сталях после их вакуумирования перед непрерывной разливкой / *С. Б. Бойченко, Ю. С. Пройдак, А. Н. Стоянов* // Бюл. Черная металлургия. — 2012. — № 5. — С. 44–46.
38. **Nascimento, Altamar D. D.** High durability carbon-free liner submerged entry nozzle / *Altamar D. D. Nascimento, Jose C. D. Pontes Jr., Gabriel H. Pigatti* [et al.] // UNITECR 2015. — Abstract-Number: 243.
39. **Nitzl, G.** High performance refractory developments for continuous casting of quality steels / *G. Nitzl, G. Krumpel, C. Eglsaeer* // UNITECR 2015. — Abstract-Number: 345. ■

Получено 18.04.17

© Л. М. Аксельрод, И. В. Кушнерев,
С. В. Сухарев, А. В. Заболотский, 2017 г.