

Авторами для решения этих задач на комбинате им. Ильича разработана программа производства особо чистой стали, которая предусматривает:

- глубокую десульфурацию и дефосфорацию чугуна порошковыми проволоками со специальными наполнителями, обеспечивающими необходимую консистенцию шлака для его скачивания;
- использование сталеразливочных ковшей с высокоглиноземистой футеровкой;
- глубокое раскисление стали и покровного шлака алюминием в сталеразливочном ковше до содержания алюминия в металле перед обработкой порошковыми кальцийсодержащими проволоками 0,05% и содержания окислов железа в шлаке не более 3%;
- продувка металла аргоном не менее 15 минут;
- защиту металла при разливке аргоном и применение шлакообразующих смесей с минимальным содержанием окислов железа и марганца;
- микролегирование стали кальцием в промежуточном ковше МНЛЗ.

В результате исследований разработана технологическая схема производства особо чистой стали, отвечающей уровню требований мировых стандартов. Она предусматривает выпечную обработку чугуна и стали порошковой проволокой со специальными наполнителями. Регламентируются некоторые технологические параметры.

### Список литературы

1. Коваль В.П., Хитаришвили М.Г., Асадцев П.С. К вопросу об ускоренных испытаниях сталей на склонность к сероводородному растрескиванию. — ФХММ, 1974, № 2, С.113.
2. Гажура М.П., Зайцев В.М. Фрактографические исследования усталостного разрушения толстолистовой стали. — В кн. Повышение качества толстого листа: Тематический сборник научных трудов. М., Металлургия, 1984, С.97–100.

© Овчинников Н.А., Разумный П.К., Шибаниц Э.Н., Гажура М.П., Ковалев Г.М., 1999.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА С ОГНЕУПОРОМ СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНЫХ СТАКАНОВ

ШЕВЧЕНКО В.П., САМБОРСКИЙ М.В. (ДОНГТУ)

*На основании экспериментальных данных описан процесс взаимодействия жидкого металла с огнеупором разливочных стаканов и предложена схема, поясняющая их затягивание*

При разливке стали, в результате длительного контакта жидкого металла с огнеупорным материалом сталеразливочных стаканов, происходит взаимодействие компонентов, содержащихся в металле, с окислами, составляющими огнеупор. Это может в одном случае вызывать затягивание стаканов, в другом — их размывание.

Для выявления причин, вызывающих это явление, моделировали взаимодействие растворенных в жидком металле компонентов с окислами огнеупора методом ввода радиоактивного изотопа, тугоплавкого индикатора и алюминия с последующим отбором и анализом контактных зон огнеупоров, остатков металла в виде литников, а также оценкой характера разливки.

В качестве радиоактивного изотопа использовали изотоп циркония-95, обладающего гамма-излучением с энергией 0,738 Мэв и бета-излучением с энергией 0,38

Мэв с периодом полураспада 65 дней. Количество циркония составляло 14 мкюри на 140-г плавку, т.е. 0,1 мкюри на тонну металла. Изотоп вводили в ковш с металлом во время выпуска плавки, после заполнения ковша на 1/3 высоты, одновременно с добавкой алюминия. В конце разливки (в промежуточном ковше еще оставался металл) был «заморожен» литник в стакане. Стакан с литником разрезали вдоль оси для снятия радиограммы. Размещение меченых атомов на снимке дало возможность оценить характер взаимодействия растворенных в металле компонентов с окислами огнеупора. Активированные частицы располагались цепочкой в зоне контакта литника с разливочным каналом стакана. Это указывает на отложение неметаллических включений, находящихся в жидкой стали, на поверхности канала при прохождении металла.

Применение радиоактивного изотопа в производственных условиях сложно, поэтому с ним была проведена только одна плавка. Дальнейшие исследования проводили методом ввода тугоплавкого индикатора, при помощи которого следили за поведением включений при прохождении их через стакан. Индикатором служил мелкодисперсный порошок окиси стронция ( $\text{SrO}$ ), полученной обжигом  $\text{SrCO}_3$ . В составе цирконового стакана этого окисла не имеется, появление его легче выявить спектральными и химическими анализами. Высокая температура плавления окиси стронция ( $2430^\circ\text{C}$ ) позволяет ожидать, что он будет находиться в твердом состоянии при прохождении через стакан.

Для введения окиси стронция в жидкий металл по ходу разливки применили приспособление, которое состояло из шамотной воронки, в днище которой монтировались 3 опытные огнеупорные вставки.

Набранные воронки за 15–20 мин до окончания разливки плавки подставляли под струю металла из промежуточного ковша на одной из машин МНЛЗ. Диаметр вставок рассчитывали таким образом, чтобы в воронке поддерживался уровень металла на высоте 150–200 мм. Это достигается при уровне металла в промежуточном ковше на высоте 550 мм диаметре канала стакана в нем 22 мм и установке в воронке 3-х вставок с диаметром 16 мм.

Для установления источников, вызывающих появление настывлей в канале вставок, в одном случае вводили тугоплавкий индикатор, в другом — алюминий, для сравнения разливали металл через воронку без каких-либо добавок. Окись стронция вводили через кварцевую трубку в струю из промежуточного ковша. Алюминий в виде прутка добавляли с различной скоростью подачи в воронку под струю. Вели наблюдение за истечением металла из вставок воронок в кристаллизатор при добавке присадок, а также отбирали пробы металла из струи промежуточного ковша и из струи одной из вставок воронки. Вставки после разливки извлекали из воронки и делали спектральный и химический анализы рабочей и нейтральной зон.

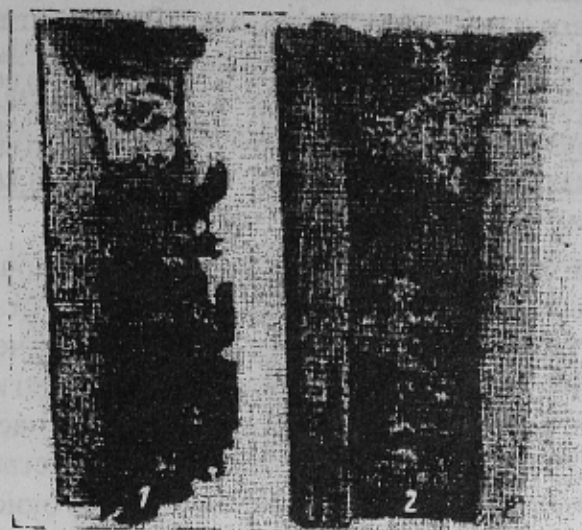
Спектральным и химическими анализами вставок после разливки с введением тугоплавкого индикатора установлено присутствие в рабочей зоне стронция в том случае, когда вводился порошок окиси стронция. Следовательно, неметаллические включения, находящиеся в жидком металле в твердом виде, взаимодействуют с поверхностью канала вставки.

Для анализа металла, при введении алюминия в струю отбирали пробы из струи перед воронкой и из струи одной из вставок воронки. Во всех случаях введение алюминия в струю металла из промежуточного ковша вызывало переполнение воронки. Истечение металла из вставок явно сокращалось, что вызывало уменьшение скорости вытягивания слитка (с 4,5 до 2,0 м/мин.). При разливке через воронку с



таким же набором вставок, без каких либо добавок наблюдалось нормальное истечение металла.

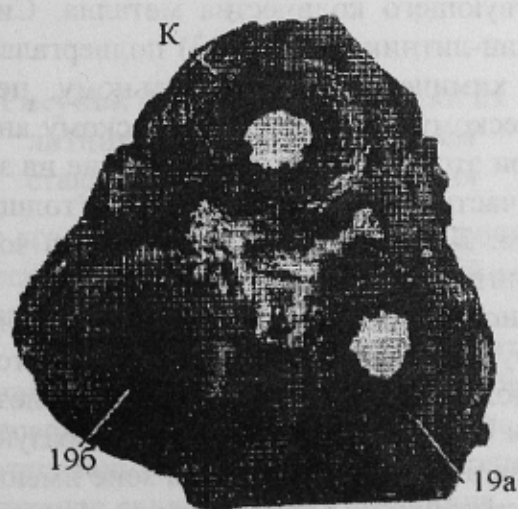
Вставки после службы извлекали из воронок, обмеряли и осматривали в зонах контакта с металлом при разливке. Во всех случаях при вводе алюминия наблюдалось уменьшение диаметра вставок. Вид их после службы показан на рисунках 1 и 2.



**Рисунок 1** – Разрез вставок после разливки металла, дополнительно раскисленного алюминием (1,45 кг/т); 1 — материал вставки из серийного стакана, 2 — материал вставки с  $Al_2O_3$  2,5%

зальтных пластинок. Изредка наблюдались сrostки из нескольких кристаллов. По своей природе корунд являлся типичным эндогенным неметаллическим включением, образовавшимся в стали при раскислении ее алюминием и отложившимся на стенке вставки во время раскисления.

Химическому и металлографическому исследованию были подвергнуты и металлические настывы, образующие в канале как бы металлический пустотелый каркас (таблица 1). В магнитной части настывей было определено содержание растворенного и связанного кремния, значения их, соответственно, равны 0,60 и 1,83%.



**Рисунок 2** - Вставки после разливки металла в собранном виде; К, 19а, 196 — марки вставок

На поперечных разрезах вставок имелись корольки металла, прочно внедренные в стенку канала. Между корольками металла обнаружен порошок светло-серого цвета, рыхлый, тонкодисперсный (см. верхнюю часть разреза вставки на рисунке 1). Спектральный анализ порошка показал, что он в основном состоит из  $Al_2O_3$  (96,6%). Под микроскопом порошок имел мономинеральный состав и был представлен высокодисперсными кристаллами  $\alpha$ -глинозема, прозрачными, бесцветными, анизотропными, с показателем преломления  $n_{sp}=1,760$ . Размер кристаллов колеблется от долей микрона до 30 мкм. У крупных кристаллов различается гексагональная форма ба-

зальтных пластинок. Изредка наблюдались сrostки из нескольких кристаллов. По своей природе корунд являлся типичным эндогенным неметаллическим включением, образовавшимся в стали при раскислении ее алюминием и отложившимся на стенке вставки во время раскисления.

Химическому и металлографическому исследованию были подвергнуты и металлические настывы, образующие в канале как бы металлический пустотелый каркас (таблица 1). В магнитной части настывей было определено содержание растворенного и связанного кремния, значения их, соответственно, равны 0,60 и 1,83%.

Поперечные разрезы настывей просматривались под микроскопом от зоны контакта с огнеупором к центру канала, в зоне между стенками вставки и дендритами металла имелись поры, заполненные глиноземом, вкрапленным в основу, состоящую из окислов Mn, Al и Si. Обнаружены дендриты металла, растущие от стенки вставки к центру канала. Структура металла в краевой зоне шлифа ферритная, на расстоянии приблизительно 3 мм от края к центру —

феррито-перлитная с преобладанием феррита.

**Таблица 1** - Химический состав металлической части настылей, образующихся в канале вставок

№	Место отбора пробы	Содержание, %					
		C	Si	Mn	S	Al <sub>раст</sub>	Al <sub>связ</sub>
1	Ковшовая проба	0,17	0,22	0,64	0,032	0,005	0,001
	Настыль	0,076	0,47	0,53	0,010	0,020	0,220
2	Ковшовая проба	0,17	0,22	0,54	0,033	0,0074	0,001
	Настыль	0,117	0,43	0,49	0,030	0,510	3,800

Таким образом, затягивание вставок является сложным процессом, включающим отложение глинозема среди оксидных фаз, закрепленных дендритами стали, при этом направление роста дендритов указывает на наличие теплоотода через стенки вставок, способствующего затягиванию канала. Появление глинозема в настылях, по-видимому, вызвано взаимодействием растворенного в металле алюминия с оксидами огнеупора и отложением продуктов взаимодействия на стенках канала вставки (стакана).



**Рисунок 3** - Продольный разрез стакана с литником

Для выяснения существа физико-химических процессов протекающих при затягивании сталеразливочных стаканов в производственных условиях проводили отбор отработанных стаканов вместе с остатком металла, условно названным литником.

При отборе литников стаканы плавков с затягиванием не прожигали кислородом до полного зарастания канала. Для сравнения, при разливке без затягивания стаканов, металл замораживался в стакане после отливки соответствующего количества металла. Система стакан-литник (рисунок 3) подвергалась осмотру, химическому, спектральному, петрографическому и металлографическому анализам. При этом было принято деление на зоны.

Стакан: тело стакана (наименее измененная часть стакана), рабочая зона (толщиной около 5 мм) и неметаллические отложения. Литник разделяли на шесть зон, толщина каждой зоны 1,5 мм; 1 — поверхность литника, 6 — середина.

Петрографическим исследованием цирконовых стаканов выявлено, что качественных различий в минеральном составе и структуре тела стакана не наблюдается. В обоих случаях в рабочих зонах содержится большее количество окислов железа, марганца, алюминия и других компонентов, чем в теле стаканов. Окислы образуют дисперсные выделения, а также входят в стекловидную фазу. В рабочей зоне имеются трещины и поры, заполненные окрашенным стекловидным порошком, в котором кристаллизуются тонкие иголки муллита, размеры их достигают  $0,002 \times 0,004$  мм. Однако рабочая зона стакана при разливке плавки с затягиванием распространяется на большую глубину и содержит больше темных непрозрачных выделений окислов железа, марганца и алюминия, проникающих из расплава. Неметаллические отложе-



ния содержат много корунда. Химический состав показывает, что имеется значительная разница в содержании  $Al_2O_3$  в отложениях при разливке с затягиванием и без него.

Исследованы макро и микроструктура и распределение химических элементов в литниках. На серных отпечатках продольных разрезов литников и шлифов (рисунки 4, 5) заметно различие поверхностного слоя литников из стаканов, через которые разливали сталь с затягиванием и без него. В первом случае в поверхностной зоне наблюдается светлый слой металла, во втором — равномерное потемнение по всему

сечению. Исследование литников проводилось на образцах, вырезанных из нижней их части вдоль оси. Если стакан затягивался при разливке, в образцах наблюдалось значительное различие в микроструктуре от периферии к центру (рисунок 6). В краевой зоне выявлены значительное обезуглероживание и рост зерна, по всей длине ее имеются надрывы, заполненные алюмосиликатными включениями. В сечении этой зоны — пористость и пленки включений по границам ферритных зерен. В центральной зоне образца структура ферритно-перлитная. Если стакан при разливке не затягивался, различий в микроструктуре от края образца к центру не наблюдалось (рисунок 7). Перлит — тонкопластинчатый, залегал по границам ферритных зерен, как в краевой, так и в центральной зонах литника.

Для дальнейшего исследования с литников соответствующих плавков было по-слойно (по диаметру) снято шесть слоев стружки (1-й слой — поверхность литника, 6-й — середина, глубина слоя 1,5 мм). При обработке литников из плавков, разлитых с затягиванием стаканов, вместе со стружкой отделялись неметаллические включения. Глубина залегания неметаллической фазы наблюдалась до 6 мм по сечению литника (при радиусе его 12 мм). Отделявшийся порошок имел светло-серую окраску и по минералогическому составу был представлен корундом, сцементированным силикатными стеклами.

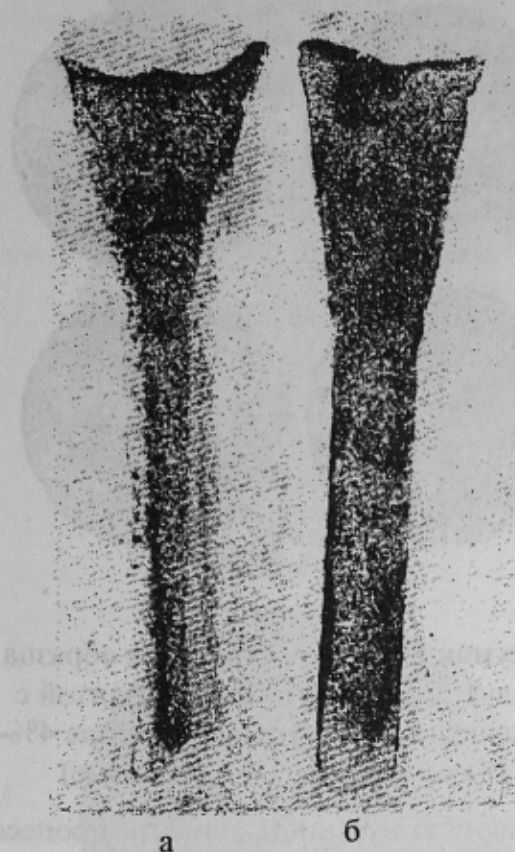


Рисунок 4 — Серные отпечатки из литников; *a* — с затягиванием стаканов; *б* — без затягивания

се его 12 мм). Отделявшийся порошок имел светло-серую окраску и по минералогическому составу был представлен корундом, сцементированным силикатными стеклами.

Исследованием стружки, снятой позонно с литника, установлено, что при разливке с затягиванием стаканов общее содержание неметаллических включений в первой его зоне в девять раз больше, чем в первой зоне литника плавки, разлитой без затягивания. Основной составляющей неметаллических включений при затягивании стаканов является окись алюминия.

В нижней части литника было большее количество неметаллических включений, чем в верхней (таблица 2).

Это объясняется, по-видимому, большей интенсивностью процесса взаимодействия жидкого металла с огнеупором вследствие подсоса кислорода из атмосферы через наружное отверстие стакана при отрыве струи от его поверхности.

В отмагниченной части стружки обнаружено, что в первых четырех слоях (глубина до 6 мм) литников плавок разлитых с затягиванием стаканов, находилось малое количество углерода и серы и большое содержание кремния, растворенного и связанного алюминия по сравнению с содержанием этих элементов в ковшевой пробе. Тогда как в другом случае распределение указанных элементов по сечению литников было, сравнительно, равномерно.

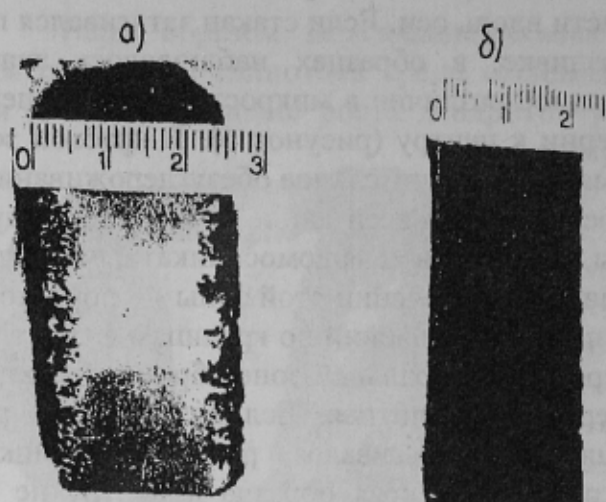


Рисунок 5 – Продольные шлифы из литников: *a* — с затягиванием; *b* — без затягивания

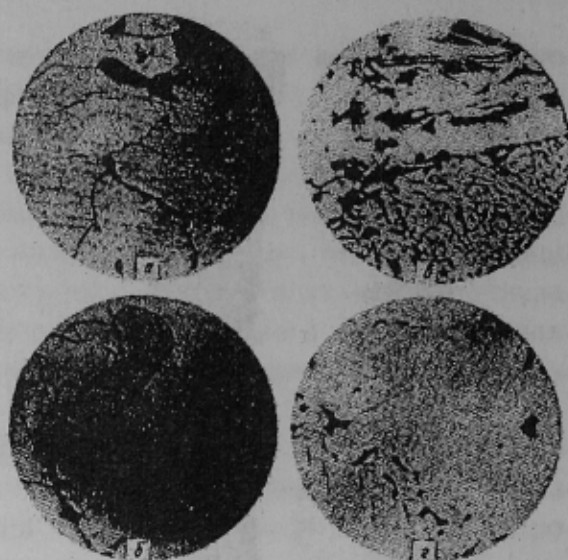


Рисунок 6 – Микроструктура образца из литника после плавки, разлитой с затягиванием стаканов (травление 4%-ым раствором  $\text{HNO}_3$  в спирте)

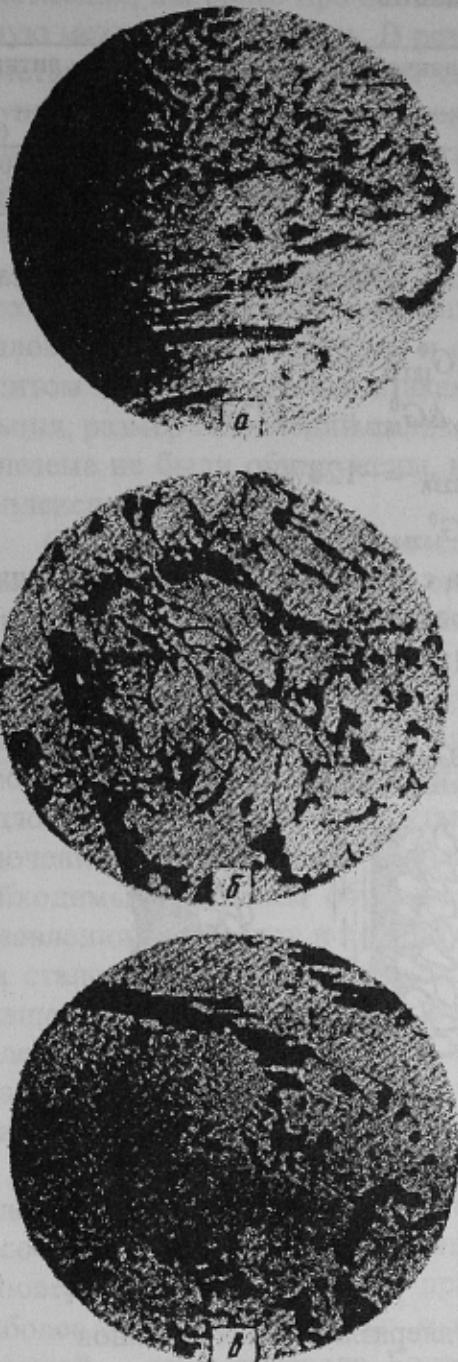
Результаты проведенных экспериментов дают возможность описать процесс взаимодействия жидкого металла с огнеупором, вызывающий образование настывлей, закрывающих выход из канала разливочного стакана.

В процессе протекания металла через разливочный стакан наблюдается проникновение металла в поры канала стакана и химическое взаимодействие металла с окислами огнеупора. Оба явления взаимосвязаны и являются результатом сложных физико-химических процессов, протекающих на границе раздела фаз жидкий металл-огнеупор. Результатом взаимодействия является затягивание или размывание стаканов. Огнеупор может в течение одной и той же разливки в начале размываться, а в конце затягиваться, если по ходу разливки изменяется природа окисленных компонентов расплава и их приток на границу раздела фаз.

Характер движения жидкости в разливочном стакане определяется её физическими свойствами и выражается через критерий Рейнольдса. При движении стали при  $1550^\circ\text{C}$  по каналу разливочного стакана диаметром 22 мм со скоростью 2,39 м/с критерий Рейнольдса составит 105160.

Величина  $R_e$  говорит о высокой турбулентности потока. Перенос вещества турбулентным потоком можно характеризовать турбулентным коэффициентом диффузии  $D_{\text{турб}}$  [ $\text{см}^2/\text{с}$ ]. При таком характере движения происходит энергичное беспорядочное перемешивание жидкости. Турбулентные пульсации переносят компоненты





**Рисунок 7** – Микроструктура образца из литника плавки, разлитой без затягивания стаканов (травление 4%-ным раствором  $\text{HNO}_3$  в спирте)  $\times 200$ . Свет отраженный: *a* — край образца; *б* — от края образца; *в* — центр образца

жидкости к поверхности обтекаемого тела. Так как коэффициент  $D_{\text{турб}}$  пропорционален макроскопическому масштабу турбулентных пульсаций, в потоке жидкости с развитой турбулентностью он превосходит коэффициент молекулярной диффузии во много тысяч раз. Огромное значение  $D_{\text{турб}}$  обеспечивает почти полное постоянство концентрации растворенных в стали элементов до весьма малых расстояний от поверхности реакции.

На основании этого можно считать, что перенос веществ, растворенных в жидкой стали, к поверхности канала разливочного стакана осуществляется турбулентными пульсациями. Необходимым условием протекания процесса в целом является смачивание сталью и окисленными компонентами поверхности канала стакана. В данном случае смачивание рабочего стакана происходит, по-видимому, вследствие химической адсорбции активными металлами кислорода окислов огнеупора. Сравнение зон взаимодействия стали и огнеупора при затягивании канала стакана и при его искусственном замораживании показывает, что в первом случае эта зона отличается большим распространением в глубину от поверхности канала и большим содержанием окислов Fe, Mn, Si и Al. На границе этой зоны с литником имеется слой, в котором содержание окиси алюминия в четыре раза больше, чем при отсутствии затягивания.

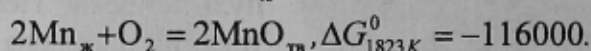
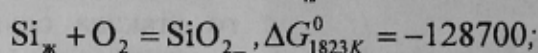
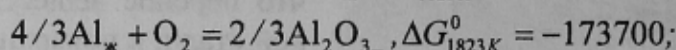
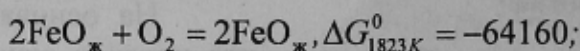
Учитывая большую кинетическую энергию струи, проходящей через стакан, вероятнее всего предположить, что на поверхность раздела жидкий металл-огнеупор действуют силы, обусловленные химическим взаимодействием. Взаимодействие расплавленного металла с огнеупором разливочного стакана в любом случае начинается с окисления стали на поверхности и в порах огнеупора. Процессу способствует наличие кислорода в воздухе, адсорбированного поверхностью и порами огнеупора, выделение растворенного в стали кислорода вследствие

понижения температуры ее при соприкосновении с огнеупором, содержание в стали растворенного алюминия, участвующего в процессах вторичного окисления.

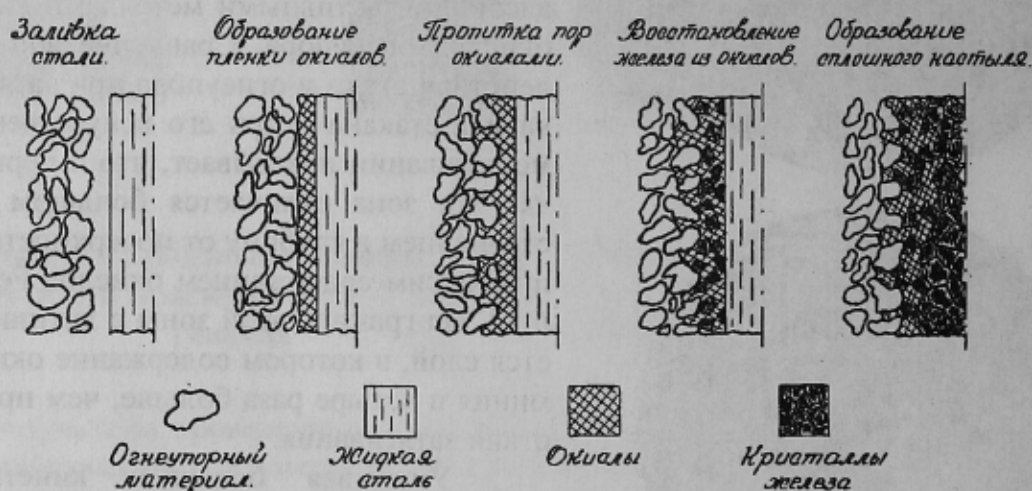
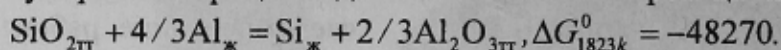
**Таблица 2** - Содержание неметаллических включений в литнике из плавки, разлитой с затягиванием стаканов

Место отбора проб	Содержание неметаллических включений по зонам литника, %					
	1	2	3	4	5	6
Верхняя часть (2/3 длины литника)	35,20	15,55	5,58	0,943	0,028	0,013
Нижняя часть (1/3 длины литника)	37,40	22,50	10,64	2,390	0,070	0,013

В связи с этим термодинамически возможно протекание следующих реакций (при температуре 1823 К):



Кроме того, алюминий, присутствующий в стали, оказывает восстанавливающее действие на огнеупор. Этот процесс идет в соответствии с реакцией:



**Рисунок 8** – Схема процесса затягивания сталеразливочных стаканов

Кремний переходит в металл. Окисленные компоненты образуют шлаковую пленку, которая обладает адгезией к поверхности стакана и к жидкому стакану. Образовавшаяся легкоплавкая шлаковая корка вследствие капиллярного эффекта проникает в поры огнеупора на некоторую глубину и закрывает их. Глубина проникновения зависит от температуры плавления шлака и его вязкости. Так как движущаяся в канале струя создает разрежение, то может происходить подсос кислорода через поры огнеупора и наружное отверстие стакана при отрыве струи от его поверхности. После закупорки пор шлаком поступление кислорода через стенку на поверхность канала стакана прекращается и начинается восстановление Fe, Mn и Si на контактной поверхности растворенным в стали алюминием, поступление которого к реакционной поверхности обеспечивается турбулентными пульсациями. В результате этого на поверхности канала стакана и в его порах образуются кристаллики железа и неме-



таллическая фаза — корунд. Кристаллики железа, образовавшиеся в результате восстановления, наиболее прочно связаны, так как располагаются в порах, что дает хорошую механическую связь. В результате реакций восстановления на границе раздела металл-огнеупор образуется слой шлака, обогащенный корундом. Обогащение корундом происходит также вследствие прилипания к поверхности огнеупора неметаллических включений, факт выделения которых из металлического расплава подтвержден прямым экспериментом ввода радиоактивного изотопа и твердого индикатора (SrO).

В металле, разливавшемся с затягиванием стаканов, основной составляющей осадка неметаллических включений была эндогенная окись алюминия в виде кристаллов размером до 0,030 мм и сростков из них размером до 0,084 мм. В металле разлитом без затягивания стаканов, включения были представлены силикатами кальция, размер включений силикатов от 0,007 мм до 0,084 мм. При этом включения глинозема не были обнаружены, или находились в виде дисперсной фазы в составе комплексных силикатов.

Следовательно, в одном случае шлаковая пленка на границе с огнеупором может обогащаться эндогенной окисью алюминия, представленной крупными сростками, в другом — силикатными комплексными включениями, в которых окись алюминия находилась как дисперсная фаза.

Как показал анализ литников, в зонах, граничащих с огнеупором, имеются неровности, которые заполнены алюминатами (при затягивании стаканов). Между включениями находились прожилки чистого железа. Очевидно, закрепление кристаллов чистого железа и запутывание между ними тугоплавких неметаллических включений на поверхности канала разливочного стакана являются на данном этапе необходимым условием образования настывлей. Образовавшиеся в результате восстановления из окислов и прочно связанные с поверхностью канала кристаллики железа становятся центрами кристаллизации, на которых происходит нарастание застывшего металла. При прочих равных условиях образование кристаллов из восстановленного железа и рост на них настывли могут начинаться в том месте поверхности канала, где температура ниже температуры их плавления. Наиболее низкая температура наблюдается в нижней части стакана.

Образование кристаллов железа на выходе из стакана приводит к повышению теплопроводности вдоль канала стакана и более интенсивному отводу тепла, что способствует росту настывли. Омывание жидкой сталью металлических кристаллов на поверхности канала стакан приводит к выделению из стали на этих кристаллах наиболее тугоплавкой фазы:  $\alpha$ -железа, содержащего незначительное количество примесей — серы, углерода. Более легкоплавкая фаза, содержащая C и S, перемещается в межосные участки растущих дендритов и смывается струей. Вследствие этого вокруг вытекающей струи образуется оболочка из почти чистого железа.

Таким образом, затягивание каналов разливочных стаканов можно представить в виде процесса, состоящего из нескольких последовательных стадий (рисунок 8):

- смачивание сталью поверхности канала огнеупорного стакана при заливке стали;
- образование пленки окислов в результате окисления компонентов металла кислородом воздуха, адсорбированного в порах, а также за счет поступления высокодисперсных включений (алюминия, кремния, марганца и др.), находящихся в металле, перенос которых к месту реакции производится турбулентными пульсациями;
- пропитка пор стакана окислами;

— восстановление железа из окислов на поверхности канала стакана алюминием, поступающим из струи металла;

— избирательная кристаллизация стали на восстановленных кристаллах железа, как на центрах кристаллизации, приводящая к образованию сплошной настыли на поверхности канала стакана, обогащенной неметаллическими включениями, алюминием и кремнием.

Следовательно, результатом взаимодействия жидкого металла с разливаемыми стаканами является пропитка огнеупора в зоне канала окислами железа, марганца, кремния и алюминия. Накопление и смывание окислов с поверхности канала разливаемого стакана при разливке происходит непрерывно. В случае образования легкоплавких соединений на границе металл-огнеупор будет происходить размывание стаканов, при образовании тугоплавких — затягивание.

Полное отсутствие разъедания или затягивания возможно при равновесии между скоростью зарождения и прилипания окисленных компонентов стали к поверхности канала стакана и их смывания. Процессу способствуют концентрация кислорода в металле к моменту прохождения его через стакан, наличие неметаллических включений с основой из тугоплавких окислов (например,  $Al_2O_3$ ) и концентрация растворенного алюминия в стали.

©Шевченко В.П., Самборский М.В., 1999.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ВИБРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЕ СЛИТКИ И ОТЛИВКИ

СМИРНОВ А.Н. (ДОНГТУ), РЕДЬКО Г.Л. (ДОНГТУ)

*На основе физического и математического моделирования исследованы гидродинамические, тепловые и кристаллизационные процессы, которые сопровождают затвердевание стальных слитков в условиях наложения виброимпульсного воздействия на жидкую фазу.*

В процессе производства промышленных отливок и слитков для подавления и предотвращения дефектов, кристаллизационного, усадочного и ликвиационного характера все большее распространение получают специальные технические приемы, которые позволяют управлять качеством металла непосредственно в процессе затвердевания. В их основе обычно используется принцип принудительного физического воздействия на жидкую фазу в ходе затвердевания посредством наложения внешнего виброимпульсного воздействия. Обобщая имеющиеся в литературе данные, относящиеся к результатам виброимпульсной обработки [1–3], следует отметить, что достижение максимального положительного эффекта обычно связывается с энергетическими показателями и характером принудительного перемешивания жидкой фазы, предпочтительным направлением движения принудительных конвективных потоков, предельной скоростью их движения, местом приложения воздействия и способом подвода энергии.

К числу физических эффектов, возникновение которых обуславливается наложением виброимпульсного воздействия, можно отнести: явление подавления потоков термогравитационной и развития вынужденной конвекции; развитие волновых процессов на поверхности и в объеме расплава; явление кавитации в объеме жидкой