

# Некоторые аспекты организации производства в условиях современного микро-завода

В последние два десятилетия в мировой металлургии обострилась конкуренция производителей металла при одновременном повышении требований к качеству металлопродукции со стороны машиностроителей. Это обусловило тенденцию модернизации сталеплавильных цехов в соответствии с современными технологическими схемами. Наряду с реконструкцией крупных металлургических комбинатов, происходит создание мини-заводов, основным преимуществом которых является гибкое реагирование на запросы рынка [1] как в условиях устойчивого рынка, так и при кризисных проявлениях в мировой экономике.

Из общей группы мини-заводов в отдельную категорию выделились так называемые микро-заводы [1, 2]. Современный микро-завод, как правило, имеет номинальный годовой объем производства до 100-150 тыс. т, что позволяет предприятию наиболее оперативно реагировать на колебания рынка металлопродукции. В то же время реальные объемы производства на определенных временных отрезках могут быть и меньше, что определяется текущей конъюнктурой рынка. При этом в состав сталеплавильного цеха входит дуговая сталеплавильная печь вместимостью 15-30 т, установка «ковш-печь», вакууматор и одно- или двух-ручьевая МНЛЗ.

Такие заводы могут решать проблемы оперативно-го снабжения металлопродукции так называемых «неметаллургических» регионов, используя региональный ресурс металлолома. Кроме того, такие комплексы имеют возможность лучше, чем конкуренты обеспечивать высококачественной металлопродукцией потребности одного сегмента рынка. В этом случае для того, чтобы стать лидером в своей области, завод должен иметь высокоспециализированное производство и качественный маркетинг.

Наряду с широким спектром преимуществ, организация производства в условиях микро-заводов обладает и определенными недостатками, к которым относятся: малая емкость сталеразливочного ковша (15-30 т), которая обуславливает повышенный износ футеровки вследствие воздействия на нее дуг электродов при внепечной обработке; повышенная стоимость продувки металла в ковше, что вызвано высокой удельной долей огнеупоров (продувочного узла) в себестоимости стали; обеспечение работы МНЛЗ микро-завода в условиях довольно широкого диапазона скоростей разливки и малого количества ручьев (1-2) обусловлено необходимостью соблюдения серийности разливки, что приводит к повышению выхода годного металла.

Поскольку данные вопросы в настоящее время недостаточно изучены, является актуальным исследование

Выполнены исследования процесса перемешивания стали в ковшах малой вместимости. Также исследован процесс непрерывной разливки стали на МНЛЗ, работающих в условиях микро-завода

процессов перемешивания металла в ковшах малой вместимости и особенностей разливки на МНЛЗ, работающей в условиях микро-завода.

## Исследование процесса перемешивания металла в ковшах малой вместимости

Главной практической задачей при изучении движения стали в замкнутом объеме ковша является оценка энергосиловых параметров потоков, то есть текущих значений скоростей и давлений в наиболее характерных их областях, а также времени гомогенизации перемешиваемой ванны по температуре и химическому составу [3, 4]. Кроме этого, значительный интерес представляет информация о поведении покровного шлака на поверхности жидкого металла во время его перемешивания и характере изменения температурных полей в объеме жидкостной системы в случае зонального подвода к ней тепла. Поэтому план экспериментальных исследований процесса перемешивания стали в ковшах малой вместимости включал несколько этапов.

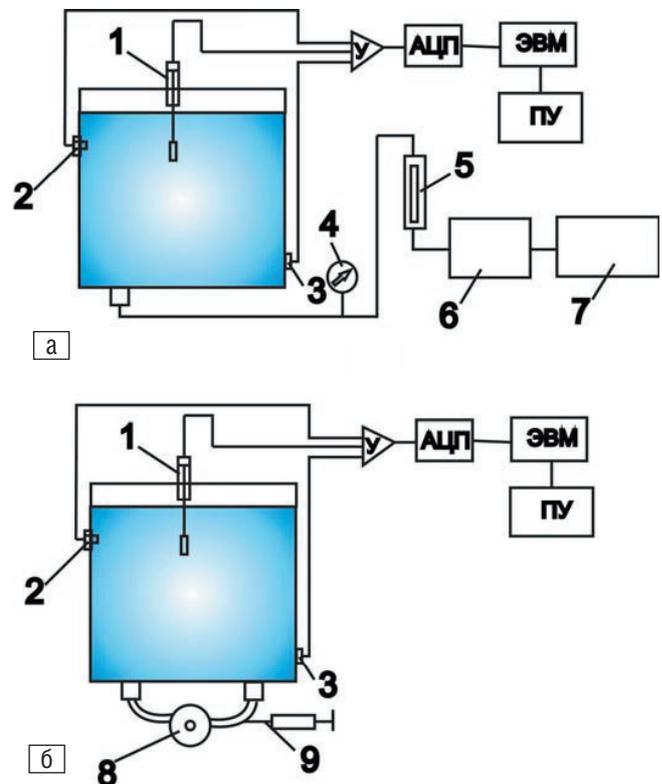


Рис. 1. Схемы лабораторных установок для имитации процессов донной продувки (а) и электромагнитного перемешивания (б) стали в разливочном ковше: 1 – зонд для измерения скорости жидкостных потоков; 2 и 3 – датчики контроля изменения концентрации солевого раствора; 4 – манометр; 5 – ротаметр; 6 – ресивер; 7 – компрессор; 8 – центробежный насос; 9 – капиллярная трубка

Исследования проводили на лабораторных установках, включавших объемную и плоскую прозрачную модель 20-тонного сталеразливочного ковша, изготовленные в масштабе 1:5 в соответствии с критериями гидродинамического подобия Фруда и гомохронности.

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов имитировали продувку жидкой стали в ковше инертным газом через донную пористую пробку, а также электромагнитное перемешивание. В первом случае (рис. 1, а), для возбуждения циркуляции модельной жидкости в нее через пористую пробку, вмонтированную в днище модели ковша, под избыточным давлением подавали воздух, поступающий по гибкому шлангу через ресивер от компрессора. Давление воздуха перед пробкой и его расход контролировали по показаниям манометра и ротаметра.

Во втором случае циркуляционный контур жидкостных потоков, по форме характерный для электромагнитного способа перемешивания стали в ковше, обеспечивали за счет использования центробежного насоса, всасывающий и нагнетательный, патрубки которого подключали к штуцерам, ввинченным в днище модели ковша на равном удалении от ее боковых стенок (рис. 1, б).

Во время моделирования процесса продувки стали через донную пористую пробку расход воздуха изменяли в пределах 0,5-6,0 л/мин, что соответствовало расходу инертного газа в реальных условиях 25-300 л/мин. По мере увеличения расхода дувавшегося воздуха изменялся режим его истечения в перемешиваемую жидкую ванну модели ковша. Строго выраженный пузырьковый режим наблюдали при расходах воздуха, не превышавших 1,5 л/мин. Дальнейшее увеличение расхода энергоносителя вызывало переход к струйному режиму с формированием замкнутого вихревого потока, воздействующего на газовый факел, в результате чего последний омывал участок поверхности стенки модели ковша протяженностью 0,6-0,75 глубины жидкой ванны. Одновременно с этим наблюдали оголение ее свободной поверхности в зоне всплытия газовых пузырей вследствие вытеснения ими слоя материала, моделирующего технологический шлак.

Увеличение скорости циркулирующей жидкости при моделировании процесса электромагнитного воздействия на расплав способствовало зарождению и существованию

отдельных вихрей, постоянно меняющих свое положение и размеры в перемешиваемой ванне.

Также был изучен процесс комбинированной продувки, при котором перемешивание осуществляли совместно двумя методами: продувкой воздухом через донную пробку с расходами 0,25-2,0 л/мин и электромагнитным способом. При этом потоки направляли навстречу друг другу, что значительно изменяло гидродинамическую обстановку в модели ковша. Встречаясь, два потока разрушались и образовывали переходную зону, в которой гидродинамика потоков значительно отличалась от вышеприведенных способов. Причем расположение зоны контакта зависело от расхода воздуха – при малых расходах эта зона располагалась ближе к продувочной пробке; при увеличении расхода зона контакта смещалась выше к мениску.

Для сопоставительной оценки эффективности усреднения химического состава перемешиваемой жидкости, которая обеспечивается моделируемыми способами воздействия на расплав в процессе его внепечной обработки в разливочном ковше, осуществили контроль времени гомогенизации жидкой ванны при различной удельной мощности, затраченной на возбуждения циркуляции потоков.

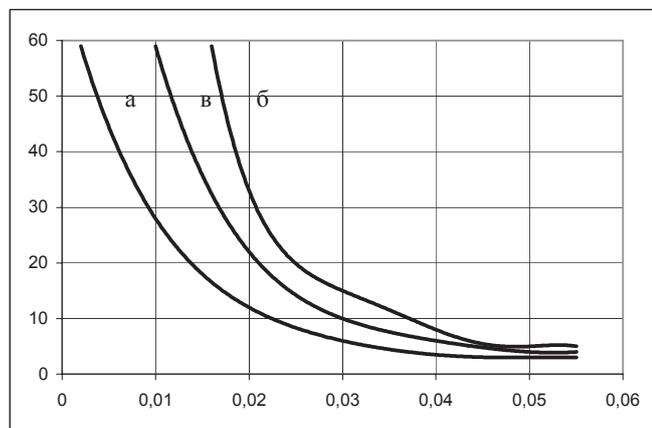
На рис. 2 показаны графики зависимости времени гомогенизации модельной жидкости от затрачиваемой удельной мощности перемешивания при имитации продувки стали инертным газом, электромагнитного воздействия на нее в разливочном ковше и комбинированной продувки. Приведенные графики позволили сделать вывод о том, что эффективность перемешивания, обеспечиваемая данными способами, находится в прямой зависимости от подводимой извне к жидкостной системе энергии. При этом заметная разница в продолжительности процесса гомогенизации модельной жидкости, проявляющаяся при малой удельной мощности перемешивания, практически нивелируется по мере увеличения затрат энергии на возбуждение циркуляции жидкостных потоков в ванне модели ковша.

Наличие явно выраженных зон циркуляции жидкостных потоков при продувке стали в ковше вызывает интенсивный локальный износ футеровки, что нашло подтверждение в ходе моделирования процесса ее размывания. Максимальный износ слоя материала (застывший раствор тиосульфата натрия), предварительно наносившийся на стенки модели ковша, наблюдали в областях с высокой скоростью движения циркулирующей жидкости. В частности, остаточная толщина имитатора футеровки модели 20-тонного разливочного ковша в вертикальном ее сечении в диаметрально противоположных зонах относительно продувочного узла различалась в 1,5-2,0 раза.

Таким образом, при перемешивании стали в ковшах малой вместимости достоинства донной продувки расплава инертным газом через пористые пробки могут быть реализованы в полной мере только при обеспечении рациональных режимов подвода газообразного энергоносителя к жидкой ванне.

#### Исследование процесса непрерывной разливки металла в условиях микро-завода

Применение МНЛЗ в условиях микро-заводов имеет определенную специфику, которая обусловлена тем, что



**Рис. 2.** Зависимость времени гомогенизации жидкости от удельной мощности перемешивания: а – при моделировании процесса донной продувки; б – при имитации электромагнитного перемешивания; в – при имитации комбинированного способа продувки

разливка осуществляется преимущественно на одно- или двухручьевых машинах, что значительно повышает требования к их работе в течение всей серии. Кроме того, как показывает выполненный анализ, в практике работы микро-заводов, находящихся в сегменте производства качественных сталей, наибольшее предпочтение отдается получению заготовок сечением (180 x 180) – (220 x 220) мм, которые разливаются закрытой струей. Такой подход позволяет получать высококонкурентную качественную продукцию, что существенно повышает потенциал микро-завода. Между тем, непрерывная разливка стали на блюмы малых сечений (или сортовую заготовку больших сечений) имеет целый ряд особенностей, которые необходимо учитывать при организации технологического процесса.

Выполненные в условиях микро-завода ДП «УбиВТ» исследования по разливке блюмов малых сечений на двухручьевой МНЛЗ показали, что значительно повысить выход годного можно за счет увеличения серийности разливки, что возможно для условий данного завода только при переходе на одноручьевую разливку. Сравнение изменений удельных затрат на огнеупоры промковша (футеровка, защитная труба, стопор, стакан-дозатор, погружной стакан) и выход годного в зависимости от количества разлитых плавков в серию показано на рис. 3. Представленные данные свидетельствуют о том, что уменьшение удельных затрат на огнеупоры наблюдается до 7-8 плавки, а далее происходит либо выравнивание затрат, либо их некоторое увеличение. Это объясняется тем фактом, что после 8-й плавки происходит очередная замена защитной трубы и погружного стакана. Кроме того, по мере увеличения серийности разливки требуется увеличивать толщину торкрет-покрытия. На практике

установлено, что для серии из 7-8 плавков достаточно нанесения слоя толщиной 30-35 мм в зоне нахождения металла и до 50-60 мм – в зоне шлакового пояса, что является минимально допустимым слоем по технологии эксплуатации торкрет-массы.

Таким образом, увеличение серийности разливки с 2-3 до 7-8 плавков в серию и переходе с 2-х ручьев на один обеспечивает выход годной заготовки 99,2-99,4 % при снижении удельных затрат на огнеупоры примерно 6,5-7,0 раз.

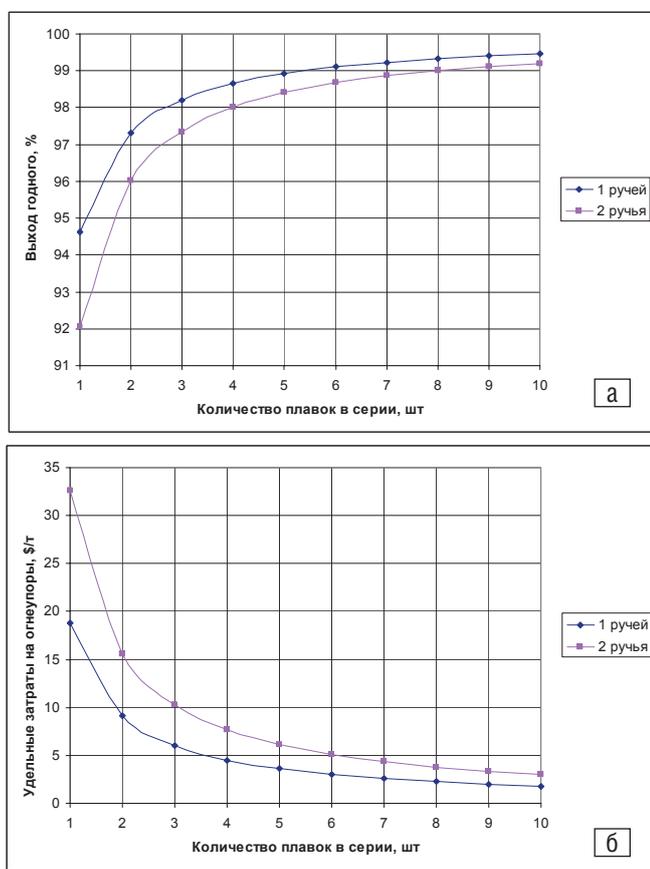
Практика разливки стали на блюмовой МНЛЗ ДП «УбиВТ» показала, что для обеспечения разливки длинными сериями время от времени приходится варьировать скорость вытяжки заготовки, что объясняется необходимостью совместить циклы подачи ковшей на МНЛЗ и их разливки. На эти циклы влияет множество организационных и технологических факторов, которые крайне трудно нивелировать при небольших массах металла в ковше. На практике нами было установлено, что в процессе разливки даже одной марки стали варьирование скоростью вытяжки заготовки может происходить в диапазоне 0,2-0,8 м/мин. Такой широкий диапазон изменения скорости вытяжки заготовки требует соответствующей корректировки интенсивности охлаждения в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). В противном случае различные участки непрерывнолитой заготовки будут охлаждаться в различных условиях, что может приводить к образованию дефектных участков.

Поэтому для обеспечения стабильности процесса разливки длинными сериями актуальной задачей является коррекция интенсивности охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения непосредственно в процессе литья. При практической реализации эта задача предполагает создание оперативной системы управления режимами охлаждения заготовки, учитывающей происходящие изменения в технологии литья в режиме текущего времени.

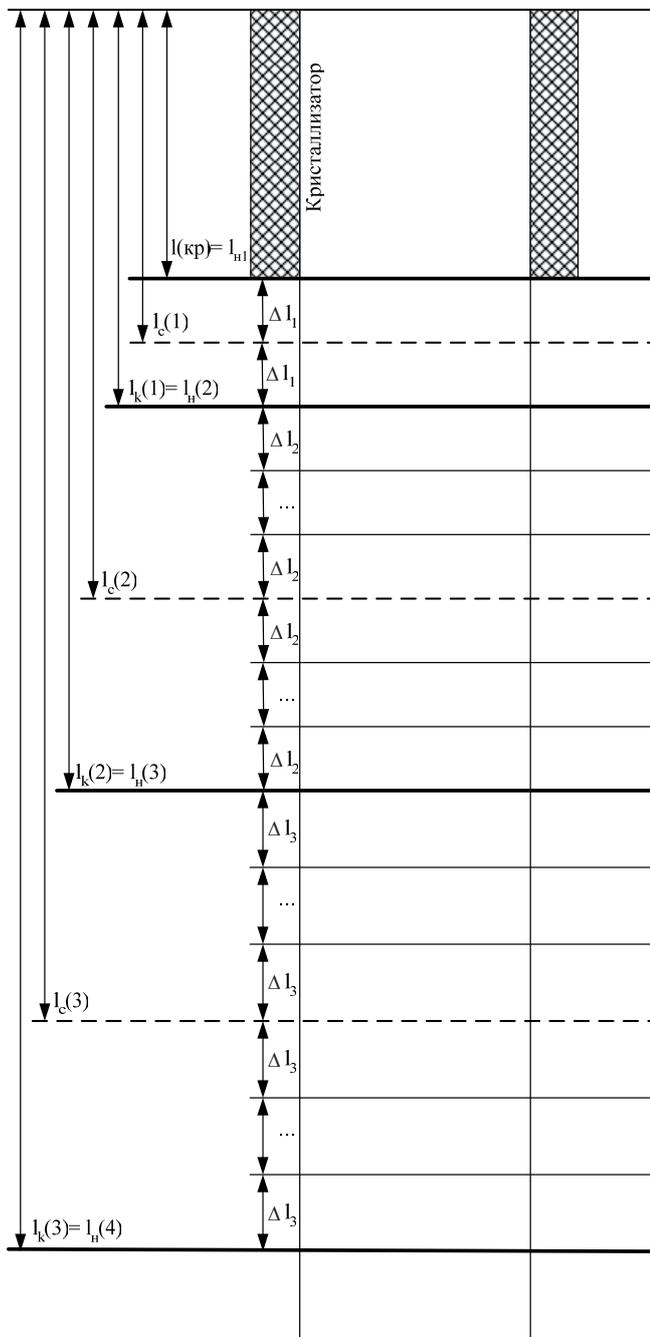
В практике управления процессами затвердевания непрерывнолитой заготовки известны два основных подхода: пропорционально-скоростной и динамический режимы управления [5].

Пропорционально-скоростной режим управления является наиболее распространенным для МНЛЗ поколения 80-х годов. Он базируется на использовании табличных данных изменения расхода воды в зависимости от скорости разливки. При этом изменение расхода воды происходит одновременно во всех секциях ЗВО одновременно с изменением реальной скорости разливки. Следовательно, такая схема управления может эффективно работать только при изменении скорости вытяжки в небольшом диапазоне.

Динамический режим управления процессом охлаждения заготовки в ЗВО начал использоваться в МНЛЗ для разливки качественных сталей в конце 90-х годов. Он предназначен для сведения к минимуму негативного влияния переходных процессов. В металлургической практике известны различные алгоритмы динамической системы управления. Общим для всех алгоритмов является история движения заготовки вдоль технологической оси и монотонное изменение расходов воды автономно по секциям в соответствии с принятым алгоритмом.



**Рис. 3.** Сравнение изменений выхода годного (а) и удельных затрат на огнеупоры промковша (б) в зависимости от количества разлитых плавков в серии

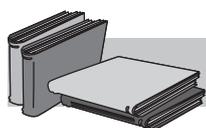


**Рис. 4.** Схематическое представление динамической модели управления расходом воды в ЗВО

Разработанный и предложенный в данной работе алгоритм базируется на расчете средней скорости перемещения заготовки для отдельно взятого участка и не требует создания массивных баз данных (рис. 4).

Технологическая база данных, используемая для реализации алгоритма, представляет собой управляющие уравнения, полученные на основе математической модели, описывающей процессы затвердевания заготовки.

Средняя скорость движения заготовки  $v_{cp}$



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Металлургические мини-заводы* / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун, Л. В. Дорохова. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.
2. *Вариант реконструкции мартеновского цеха специализированного металлургического завода* / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун и др. // *Сталь*. – 2006. – № 8. – С. 8-9.

оценивается в средней точке каждой секции зоны вторичного охлаждения. Для того, чтобы при начале разливки определить данную скорость для каждой секции, необходимо расстояние от начала секции до ее середины поделить на целое количество участков длиной  $\Delta l_s$  ( $s$  – номер секции ЗВО). Исходя из вышесказанного, разбивку секций ЗВО можно осуществить с помощью формулы:

$$\Delta l_s = \frac{l_s}{2 * n_s} \quad (1)$$

где,  $l_s$  – длина  $s$ -ой секции ЗВО;  $\Delta l_s$  – длина участка первой зоны;  $n_s$  – целое число, определенное для каждой секции.

Разработанная система динамического управления охлаждением заготовки в ЗВО при переходных режимах разливки отработана в промышленных условиях на слябовых МНЛЗ № 3 и 5 металлургического комбината «Азовсталь». Выполненные замеры колебаний температуры поверхности заготовки в ЗВО (с помощью пирометра) показали, что при использовании системы динамического управления охлаждением заготовки колебания температуры поверхности заготовки переходных участков при изменении скорости вытяжки заготовки составляют 2-3 °С. Для аналогичных условий при пропорционально скоростной схеме корректировки охлаждения колебания температуры поверхности отдельных участков составили 12-15 °С.

### Выводы

На основании выполненных в лабораторных и промышленных условиях исследований получены следующие выводы.

1. Для условий внепечной обработки стали в ковшах малой вместимости рекомендуется применять метод электромагнитного перемешивания. Достоинства донной продувки расплава инертным газом через пористые пробки могут быть реализованы в полной мере только при обеспечении рациональных режимов подвода газообразного энергоносителя к жидкой ванне, к которым следует отнести комбинирование такого метода продувки с электромагнитным перемешиванием.

2. Установлено, что уменьшение удельных затрат на огнеупоры наблюдается до 7-8 плавки в серии, а далее происходит либо выравнивание затрат, либо их некоторое увеличение. Это объясняется тем фактом, что после 8-й плавки происходит очередная замена защитной трубы и погружного стакана.

3. Разработана система динамического управления системой вторичного охлаждения заготовки в ЗВО при переходных процессах (изменениях скорости разливки), которая существенно снижает перепады температуры поверхности заготовки. Такая система позволяет стабилизировать процесс разливки длинными сериями и обеспечивать стабильную работу МНЛЗ в условиях микро-заводов.

3. Гридин С. В., Цупрун А. Ю., Минц А. Я. Математическое и физическое моделирование перемешивания металла в ковше при донной продувке аргоном // *Металлургическая и горнорудная пром-сть*. – 2002. – № 10. – С. 110-114.
4. Шалимов А. Г. Анализ эффективности перемешивания металла в ковше на основе новых шведских разработок // *Сталь*. – 2004. – №1. – С. 25-30.
5. Целесообразность динамического управления зоной вторичного охлаждения // А. Н. Минтус, А. Ю. Цупрун, Д. А. Денисенко, В. Ю. Мариничев. *Наукові праці Донецького НТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. – 2007. Вип. № 7(128). – С. 91-94.

УДК 621.771

Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко (ОАО «Завод «Универсальное оборудование»)

## Особенности усвоения кальция из порошковой проволоки с комплексным наполнителем СК40

В современном сталеплавильном производстве внепечная обработка кальцийсодержащими порошковыми проволоками является неотъемлемой частью технологии и занимает ведущее положение в связи с многофакторностью влияния кальция на физико-химическое состояние расплава, макро- и микроструктуру заготовки, качество и свойства металлопродукции.

Эффективность влияния кальция на свойства жидкой и твердой стали зависит от его усвоения при вводе в жидкий металл. Кальций – высокоактивный элемент, имеющий температуру плавления 851 °С и температуру испарения – 1492 °С, поэтому предпочтительно в расплав вводить его в виде сплава с кремнием. До последнего времени в мировой металлургической практике силикокальций марки СК30 являлся наиболее широко используемым сплавом для ввода кальция в сталь. Это обусловлено тем, что такое соотношение компонентов в сплаве (30 % Са и 60 % Si) обеспечивает оптимальное сочетание основных теплофизических параметров, влияющих на усвоение кальция – весьма важный технологический и экономический аспект применения порошковой проволоки [1].

При температурах жидкой стали упругость паров кальция составляет приблизительно 0,15–0,2 МПа (выше, чем у силикокальция). Для того чтобы воспрепятствовать испарению кальция, ферростатическое давление металла в ковше должно быть выше упругости паров кальция. В зависимости от температуры обработки испарение кальция может начаться на любой глубине, когда парциальное давление паров кальция станет равным внешнему давлению расплава, поэтому оптимальная скорость ввода порошковой проволоки должна обеспечивать расплавление оболочки и взаимодействие наполнителя с жидким металлом в нижней части ковша.

Степень усвоения кальция зависит как от глубины высвобождения наполнителя из стальной оболочки, так и от физико-химических свойств силикокальция.

В последние годы все большее количество металлургических предприятий при внепечной обработке переходит на использование силикокальция СК40. Эта технология была разработана сотрудниками ОАО «Завод «Универсальное оборудование» [2, 3]. Такой

Экспериментальным способом установлено, что для достижения заданного содержания кальция в металле расход проволоки с СК40 в 1,4–1,6 раза меньше, чем с СК3, а уровень усвоения кальция при использовании проволоки с комплексным наполнителем СК40 на 15–30 % выше по сравнению с силикокальцием СК30. Это обуславливает значительную экономию затрат при использовании этого вида порошковой проволоки, а также целый ряд технических преимуществ

марки силикокальция в ГОСТах нет и этот материал не производится, а получается внутри проволоки в процессе ее изготовления путем специально организованной подачи из разных дозаторов порошков силикокальция и металлического кальция. При этом в процессе ввода проволоки образуется сплав и необходимое содержание кальция в ферросплаве достигается непосредственно при обработке жидкого железоуглеродистого расплава.

Высокая эффективность использования СК40 обусловлена тем, что сплав с массовой долей кальция 40 % образуется из шихтовых компонентов (силикокальция СК30 и кальция металлического) по мере вхождения порошковой проволоки в жидкий металл. При этом образование соединений кальция с кремнием происходит с поглощением тепла, что снижает температуру в зоне реакции. Кроме того, образующийся сплав СК40 имеет температуру плавления на 85 °С выше, чем СК30. Все это приводит к уменьшению температуры в микрообъемах зон взаимодействия силикокальция и расплава, снижению угара кальция и повышению его усвоения при внепечной обработке стали. Вследствие этого не происходит увеличения пироэффекта и более интенсивного выделения газов по сравнению с проволокой с СК30.

Изготовление проволоки на специально разработанной линии обеспечивает стабильность химического состава комплексного наполнителя по длине проволоки, а также оптимальные условия растворения и физико-химического взаимодействия компонентов наполнителя.

ОАО «Завод «Универсальное оборудование» имеет аттестованную методику выполнения измерений при контроле качества порошковой проволоки с наполнителем СК40.

В работе [4] представлена диаграмма состояния Са–Si, на которой показаны рассчитанные авторами точки, соответствующие массовому соотношению между кальцием и кремнием в силикокальции СК30 и СК40.