

к.т.н. Кузнецов Д.Ю.

(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, MChM-DonGTU@yandex.ru)

## ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕСИЛИКОНИЗАЦИИ МАЛОКРЕМНИСТОЙ АВТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ В АКП

Приведены результаты промышленного эксперимента по изучению процесса десиликонизации малокремнистой автолистовой стали при внепечной обработке в агрегате ковши-печь, проведенного в условиях действующего производства на ПАО «Алчевский металлургический комбинат». Установлены условия, при которых присадка периклаза в область горения электрических дуг позволяет снизить содержание кремния в металле.

**Ключевые слова:** автолистовая сталь, кремний, десиликонизация, агрегат ковши-печь.

В последнее десятилетие все большую долю в сортаменте производства современных металлургических предприятий занимают стали, изделия из которых получают путем глубокой вытяжки при холодной обработке давлением. Поскольку основным потребителем таких сталей является автомобилестроение, они получили также название автолистовые стали.

Обеспечение высокой пластичности для глубокой вытяжки при холодной прокатке без образования дефектов является главной задачей для технологов сталеплавильных цехов и, в то же время, главным требованием к качеству такого металла. В свою очередь, пластичность стали зависит от содержания таких примесей, как углерод, сера, цветные металлы, азот и кремний.

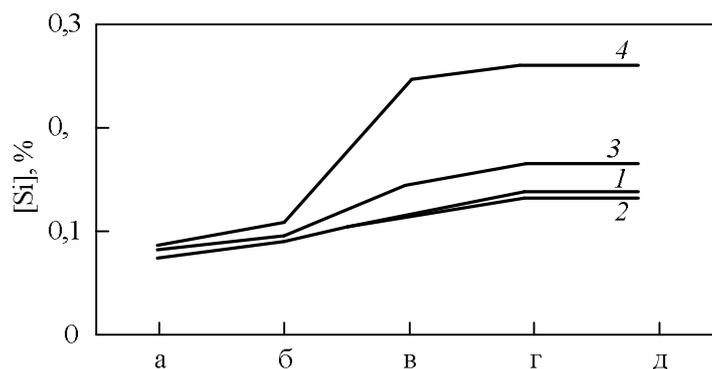
Если вопросы, связанные с получением заданного содержания углерода, серы и азота на современных предприятиях большей частью решены, то вопрос удаления избыточного кремния при производстве малокремнистых автолистовых сталей остается актуальным и требует дополнительных исследований [1].

Среди зарубежных металлургических предприятий, близким по условиям производства к современным украинским заводам, наибольший опыт по производству малокремнистой низкоуглеродистой стали накоплен на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). В сортаменте ММК доля производства сталей типа 08Ю и IF, в которых массовую долю кремния ограничивают до 0,02-0,03%, всегда была значительной.

В конвертерном цехе комбината применяют четыре технологических варианта:

1) агрегат доводки стали (АДС) – МНЛЗ; 2) комбинированная установка вакуумирования стали (КУВС) – МНЛЗ; 3) агрегат ковши-печь АКП-1 (нагрев и доводка состава металла без десульфурации) – МНЛЗ; 4) АКП-2 (нагрев и доводка состава металла с десульфурацией) – МНЛЗ [2]. Проведенный анализ показал, что заметный прирост содержания кремния происходит при обработке стали в АКП (варианты 3 и 4). При варианте 3 (без десульфурации) прирост содержания кремния составляет в среднем 0,005%, а в случае десульфурации (вариант 4) он намного значительнее – в среднем 0,017% (рис. 1.3) [3]. Таким образом, именно в АКП создаются условия для насыщения стали кремнием.

Несмотря на наличие достаточно большого количества технологических схем, способствующих получению низкого содержания кремния в малокремнистых автолистовых сталях, все они имеют ряд существенных недостатков, обусловленных: невозможностью полной отсечки шлака перед выпуском стали в сталеразливочный ковш; необходимостью глубокого раскисления металла и шлака алюминием для эффективной десульфурации, а, следовательно, созданием условий для алюминотермического восстановления кремния; повышенным расходом извести для связывания  $\text{SiO}_2$  и ухудшающейся при этом жидкоподвижности шлака; необходимостью использования кремнийсодержащих материалов и нагрева металла, что также способствует приросту содержания кремния и получению его в стали выше регламентированных концентраций.



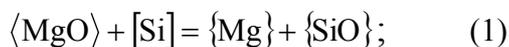
а – после выпуска; б и в – в начале и конце ковшевой обработки; г и д – в начале и конце разливки

Рисунок 1 – Динамика изменения содержания кремния по ходу технологического процесса ММК при четырех вариантах ковшевой обработки (см. в тексте)

В связи с этим, возникает необходимость усовершенствования технологии внепечной обработки стали для получения регламентированного содержания кремния в действующих производственных условиях и при минимальных затратах.

Одним из наиболее эффективных путей решения задачи получения регламентированного содержания кремния в малокремнистой автолистовой стали является разработанная автором технология внепечной обработки, предусматривающая десиликанизацию металла в сталеразливочном ковше путем расходования кремния стали на реакции восстановления компонентов шлака кремневосстановительным процессом в условиях низкотемпературной плазмы дугового разряда АКП.

В частности, предложено косвенное окисление кремния за счет восстановления магния из MgO (силикотермии магния):



$$\Delta G_T = 283195 + 30,8 \cdot T \cdot \lg(T) - 94,06 \cdot T, \text{ Дж/моль.}$$

По результатам термодинамического расчета, проведенного для реальных условий процесса, установлено, что температура начала процесса силикотермии магния составляет 2900-3300<sup>0</sup>С, следовательно, его протекание возможно только в высокотемпературной области на границе раз-

дела металл-шлак вокруг дуг агрегата ковш-печь.

Для подтверждения гипотезы о протекании процесса силикотермии магния при вводе на границу раздела металл-шлак в высокотемпературную область работы электрической дуги АКП твердого оксида магния были проведены дополнительные исследования путем организации двухфакторного эксперимента.

Исследования данного процесса проводили с применением активного эксперимента по известной методике [4]. В качестве изучаемых факторов были выбраны массовый расход оксида магния  $M_{\text{MgO}}$  (кг) и длительность дугового нагрева металла  $\tau_n$  (мин.) после присадки MgO-содержащего материала.

Для инициации процесса силикотермии магния, сопровождающегося удалением кремния из металла, на границе раздела металла и шлака в высокотемпературной области электрической дуги АКП требуется наличие твердых частиц оксида магния, создающих поверхность для выделения газообразных продуктов реакции (1). При этом необходимо учесть возможное растворение части вводимого оксида магния в рафинировочном шлаке. Среднее содержание (MgO) составляет в конце обработки (когда наблюдается интенсивное восстановление кремния) 5,5% при средней массе шлака 6,3 т (2,1% от массы металла).

Количество вводимого оксида магния ограничено химическим составом шлака, поскольку, как известно [5-6], MgO при его содержании в рафинировочном шлаке 6-8% улучшает свойства шлака, а при содержании более 10% – приводит к загущению шлака и снижению его реакционной способности. Также при определении количества вводимого MgO учитывался его переход в шлак при износе периклазоуглеродистой футеровки ковша АКП в течение всего времени обработки металла. Поэтому количество присаживаемого MgO необходимо выбрать таким образом, чтобы при его растворении шлак оставался жидкоподвижным и сохранял рафинирующую способность независимо от интенсивности протекания процесса силикотермии магния.

В качестве основного уровня для первого фактора было принято количество присаживаемого MgO равное 100 кг. При присадке такого количества материала содержание MgO в шлаке может повыситься до 7,1% (без учета процесса силикотермии магния). Для величин верхнего, нижнего уровня и «звездных» точек был принят расход MgO 150, 50, 170,7 и 29,3 кг, который дает содержание MgO в шлаке соответственно 7,9, 6,3, 8,2 и 6,0%. Таким образом, для всех вариантов опыта присадка дополнительного количества MgO не будет ухудшать свойств шлака, что очень важно для непрерывного протекания процессов рафинирования металла.

Наличие мощной электрической дуги с высокой температурой, наравне с наличием в системе твердых частиц оксида магния, является необходимым условием для протекания реакции силикотермии магния. В связи с этим длительность горения дуги (длительность дугового нагрева металла) при вводе оксида магния также должна прямопропорционально влиять на эффективность удаления кремния из металла.

Поскольку опыты проводились в условиях действующего производства, основным ограничивающим фактором при выборе длительности нагрева после присадки оксида магния стало время обработки стали в АКП, обычно не превышающее 40 – 50 мин. В качестве основного уровня для второго фактора была принята величина длительности нагрева равная 5 мин., а с учетом «звездных» точек был получен интервал этой величины 2,2 ÷ 7,8 мин. Во избежание нарушения ритма подачи ковшей на МНЛЗ, каждый опыт с заданным временем нагрева проводился в зависимости от условий обработки опытных плавок в АКП.

Расчет значений независимых переменных, использованных при планировании опытов для определения влияния присадок оксида магния на содержание кремния в стали приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Значения изучаемых факторов при планировании опытов для определения влияния присадок оксида магния на содержание кремния в стали

№ п/п	Изучаемые факторы	Масса оксида магния, кг	Время нагрева, мин.
1	Основной уровень (0)	100	5
2	Единица варьирования	50	2
3	Верхний уровень (+1)	150	7
4	Нижний уровень (-1)	50	3
5	«Звездная» точка (+1,4142)	170,7	7,8
6	«Звездная» точка (-1,4142)	29,3	2,2
	Кодовое значение переменных	$\chi_1$	$\chi_2$

Матрица планирования эксперимента с одной центральной точкой представлена в табл. 2. Из нее следует, что для проведения полного факторного эксперимента с реализацией комбинаций на пяти уровнях (включая «звездные» точки) необходимо поставить 9 опытов. Измеряемое по результатам опытов изменение содержания кремния в стали обозначили как  $\gamma$ .

Опыты проводились в условиях действующего производства в агрегате ковш-печь кислородно-конвертерного цеха ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК»), характеристики которого приведены в табл. 3.

В соответствии с планом эксперимента было проведено 9 опытов во время внепеч-

ной обработки в АКП плавков марки стали 1006, выплавляемой по стандарту SAE.

В качестве MgO-содержащего материала применялся плавеный периклаз марки ППК-95 с содержанием MgO не менее 95% и крупностью 10-20 мм. Выбор данного материала был обусловлен необходимостью обеспечить его поступление на границу металла и шлака, что достигается благодаря большей плотности периклаза ( $3800 \text{ кг/м}^3$ ) по сравнению с плотностью конечного шлака АКП ( $3500 \text{ кг/м}^3$ ).

Навески материала были сделаны предварительно и использовались в опытах в зависимости от выбранного времени нагрева для каждого отдельного опыта.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента

Матрица планирования с одной центральной точкой						
$\chi_0$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_1^2$	$\chi_2^2$	$\chi_1 \chi_2$	$\gamma$
+1	-1	-1	+1	+1	+1	$\gamma_1$
+1	-1	+1	+1	+1	-1	$\gamma_2$
+1	+1	-1	+1	+1	-1	$\gamma_3$
+1	+1	+1	+1	+1	+1	$\gamma_4$
+1	-1,4142	0	+2	0	0	$\gamma_5$
+1	+1,4142	0	+2	0	0	$\gamma_6$
+1	0	-1,4142	0	+2	0	$\gamma_7$
+1	0	+1,4142	0	+2	0	$\gamma_8$
+1	0	0	0	0	0	$\gamma_9$

Таблица 3 – Основные технические характеристики агрегата ковш-печь

Параметр	Величина
Вес плавки, т	300
Средняя длительность обработки, мин.	40
Диаметр электрода, мм	457
Ход электрода, мм	2600
Угол распада электродов, мм	800
Мощность трансформатора, МВА	50
Скорость нагрева, $^{\circ}\text{C/мин.}$	4 – 5
Глубина металлической ванны, мм	4700-4800
Минимальная величина свободного борта, мм	850
Количество продувочных узлов, шт.	2
Расход вдуваемого газа, л/мин. (на 1 пробку)	50-600

Присадка периклаза в сталеразливочный ковш при проведении промышленного эксперимента осуществлялась вручную через рабочее окно в своде-крышке АКП, поскольку механизированный ввод материала через систему бункерной эстакады и конвейеров АКП в данном случае не дает возможности ввести материал в требуемую реакционную область, расположенную под электродами. Для определения изменения содержания кремния в стали после завершения каждого опыта отбирались пробы металла с помощью одноразового пробоотборника ПМ-34.

Для всех опытов была выбрана постоянная ступень работы трансформатора АКП (8-я), позволяющая нагревать расплав со скоростью 4-5<sup>0</sup>С/мин. и, тем самым, обеспечить температурные условия процесса силикотермии магния, а также постоянная интенсивность аргонной продувки расплава в ковше (100 л/мин.), обеспечивающая подвод кремния в зону реакции, и, в то же время, отсутствие оголения зеркала металла.

Значения переменных факторов согласно матрице планирования и результаты опытов представлены в табл. 4.

Полученные значения величины снижения содержания кремния в стали будут представлять выход  $\gamma$ . Для получения уравнения зависимости вида  $\eta = f(\chi_1; \chi_2)$  были определены коэффициенты регрессии  $b_i$ . Коэффициенты  $b_i$  в искомом уравнении:

$$b_0 = \chi_0 \cdot \gamma - \frac{1}{2} \chi_1^2 \cdot \gamma - \frac{1}{2} \chi_2^2 \cdot \gamma = -0,0025;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \chi_1 \cdot \gamma = 1,1305 \cdot 10^{-5};$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \chi_2 \cdot \gamma = 0,0009;$$

$$b_3 = \frac{1}{2} \chi_0 \cdot \gamma - \frac{11}{32} \chi_1^2 \cdot \gamma - \frac{7}{32} \chi_2^2 \cdot \gamma = -9,5208 \cdot 10^{-8};$$

$$b_4 = \frac{1}{2} \chi_0 \cdot \gamma - \frac{7}{32} \chi_1^2 \cdot \gamma - \frac{11}{32} \chi_2^2 \cdot \gamma = -0,0001;$$

$$b_{1,2} = \frac{\chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \gamma}{4} = 9,25 \cdot 10^{-6}.$$

В общем виде зависимость будет выглядеть следующим образом

$$\Delta Si = -0,0025 + 1,1305 \cdot 10^{-5} \cdot M_{MgO} + 0,0009 \cdot \tau_H - 9,5208 \cdot 10^{-8} \cdot M_{MgO}^2 - 0,0001 \cdot \tau_H^2 + 9,25 \cdot 10^{-6} \cdot M_{MgO} \cdot \tau_H. \quad (2)$$

По полученному уравнению построена графическая зависимость величины снижения содержания кремния в стали от расхода оксида магния и времени нагрева металла (рис. 2). Полученный график показывает значительную связь между количеством удаляемого из стали кремния, как с расходом оксида магния, так и со временем дугового нагрева.

Таблица 4 – Значения переменных факторов и результаты опытов

№ опыта	M <sub>MgO</sub> , кг	τ <sub>H</sub> , мин.	[Si], %		Δ[Si], %
			до	после	
1	50	3	0,0200	0,0191	0,0009
2	50	7	0,0245	0,0215	0,0030
3	150	3	0,0248	0,0213	0,0035
4	150	7	0,0284	0,0191	0,0093
5	29,3	5	0,0234	0,0222	0,0012
6	170,7	5	0,0248	0,0190	0,0058
7	100	2,2	0,0205	0,0193	0,0012
8	100	7,8	0,0287	0,0236	0,0051
9	100	5	0,0222	0,0178	0,0044

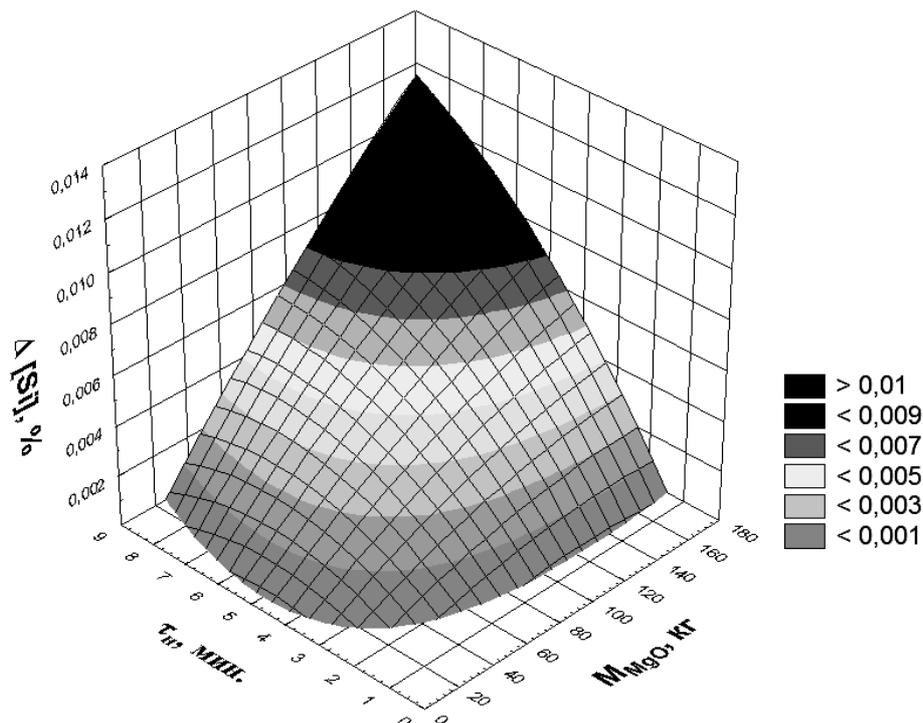


Рисунок 2 – Зависимость количества удаляемого кремния от расхода оксида магния и длительности дугового нагрева металла

Как видно, максимальное количество кремния можно удалить из металла путем ввода в зону работы дуги максимально возможного количества оксида магния, обеспечив при этом необходимое время горения дуги для наиболее полного протекания процесса силикотермии магния.

На всех опытных плавках было получено снижение содержания кремния в стали, удалось избежать превышения максимального предела по содержанию кремния в готовой стали, причем для двух плавков (опыты № 4 и 8 в табл. 4), где содержание кремния было выше допустимого, было обеспечено требуемое его содержание – ниже 0,025%.

Таким образом, было установлено, что при внепечной обработке в АКП низкоуглеродистой малокремнистой стали, содержащей 0,02-0,06% алюминия, под шлаками, суммарное содержимое оксидов железа и марганца в которых не превышает 1,5%, присадка периклаза фракцией 10-20 мм в область горения электрических дуг в количестве 30-170 кг позволяет на протяжении

3-8 минут снизить содержание кремния в металле на 0,001-0,01%.

На основании полученных результатов и опыта работы агрегатов ковш-печь на отечественных предприятиях, была разработана следующая последовательность технологических приемов для процесса десиликонизации малокремнистых сталей в АКП в случае превышения содержания кремния в стали выше допустимого предела.

1. После получения результатов химического анализа металла с превышением содержания кремния в стали выше допустимого предела присадить в ковш плавленный периклаз.

2. После присадки периклаза произвести нагрев на ступенях трансформатора, обеспечивающих нагрев стали на 4-5<sup>0</sup>С/мин.

3. Количество MgO для присадки в ковш и длительность нагрева определять в зависимости от необходимого количества удаляемого из металла кремния согласно зависимости (2). Необходимое количество удаляемого из металла кремния определяется мастером смены или сталеваром. Содержа-

ния кремния перед разливкой необходимо обеспечить на 0,002-0,003% ниже верхнего предела для обрабатываемой марки стали.

4. Присадку периклаза производить на поверхность шлака в область работы электродов. Шлак перед вводом периклаза должен быть жидкоподвижным.

5. В процессе десиликонизации производить продувку металла аргоном с расходом 100-250 л/мин.

6. По окончании нагрева отобрать пробу металла для контроля содержания кремния. При необходимости повторить корректировку содержания кремния по пунктам 1-5.

Внедрение усовершенствованной технологии внепечной обработки малокрем-

нистых автолистовых сталей в АКП ПАО «АМК» позволило исключить необходимость применения принудительного вторичного окисления кремния и, как следствие, сократить расход алюминия при внепечной обработке стали на 2,0 кг/т.

Применение внедренной технологии в течение одного календарного месяца позволило исключить отсортировку по содержанию кремния 2700 т непрерывнолитых заготовок, за счет которых выход годных слябов повысился на 3,24%, при этом экономический эффект составил 313092 грн.

### Бібліографічний список

1. Поживанов М.А. Выплавка стали для автолиста / М.А. Поживанов, Е.Х. Шахпазов, А.Г. Свяжнин. – М.: Интерконтакт-Наука, 2006. – 165 с.
2. Бодяев Ю.А. Выплавка и внепечная обработка IF-стали в кислородно-конвертерном цехе ОАО ММК / Ю.А. Бодяев, А.А. Степанова, В.В. Фролов // *Металлург.* – 2005. – № 8. – С. 44-45.
3. Валиахметов А.Х. Особенности изменения содержания кремния в малоуглеродистой стали во время ковшевой обработки / А.Х. Валиахметов // *Сталь.* – 2004. – № 7. – С. 22-23.
4. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
5. Кудрин В.А. *Металлургия стали* / В.А. Кудрин. – М.: *Металлургия*, 1989. – 560 с.
6. Дюдкин Д.А. Производство стали на агрегате ковши-печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк: ООО "Юго-Восток, ЛТД", 2003. – 300 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.*

Статья поступила в редакцию 26.06.13.

**к.т.н. Кузнецов Д.Ю.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

### **ПРОМІСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЕСИЛІКОНІЗАЦІЇ МАЛОКРЕМЕНИСТОЇ АВТОЛИСТОВОЇ СТАЛІ В АКП**

*Приведені результати промислового експерименту по вивченню процесу десиліконізації малокременистої автолистової сталі при позапічній обробці в агрегаті ківш-піч, проведеного в умовах діючого виробництва на ПАТ «Алчевський металургійний комбінат». Встановлені умови, за яких присадка периклазу в область горіння електричних дуг дозволяє понизити вміст кремнію в металі.*

**Ключові слова:** автолистова сталь, кремній, десиліконізація, агрегат ківш-піч.

**Kuznetsov D.Yu.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

### **INDUSTRIAL ASSAY OF A NEW TECHNOLOGY OF LOW-SILICON STEEL FOR AUTOMOBILE-BODY SHEET DESILICATION IN A LADLE-FURNACE UNIT**

*The brought results over of industrial experiment on the study of the low-silicon steel for automobile-body sheet desilication process at out-of-furnace treatment in a ladle-furnace unit, conducted in the conditions of operating production of OJSC «Alchevsk iron and steel works». Set terms at that the additive of periclase in the area of burning of voltaic arcs allows to bring down content of silicon in a metal.*

**Key words:** steel for automobile-body sheet, silicon, desilication, ladle-furnace unit.