

УДК 669.14.018.262

к.т.н. Кузнецов Д. Ю.

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

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ МЕТАЛЛ-ШЛАК ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ МАЛОКРЕМНИСТОЙ СТАЛИ В АКП

Приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию возможности протекания в условиях агрегата ковш-печь процессов алюминио- и карботермического восстановления кремния из SiO_2 рафинировочного шлака. Определена доля кремния, восстанавливаемого из кремнезема шлака при получении в агрегате ковш-печь низкоуглеродистой малокремнистой раскисленной алюминием стали, которая для процесса карботермии кремния углеродом графитированных электродов составляет 87–93%, а для процесса алюминотермии кремния алюминием, растворенным в металле, – 7–13%.

Ключевые слова: кремний, малокремнистая сталь, агрегат ковш-печь, шлак, карботермия, алюминотермия.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Присутствие в низкоуглеродистой стали, применяемой для глубокой и особо сложной вытяжки, минимального содержания кремния (на уровне следов) является неизменным требованием технологов-прокатчиков при производстве изделий для кузовов автомобилей, поскольку кремний повышает предел текучести и предел прочности, но вместе с тем снижает относительное удлинение стали [1]. Вместе с тем, в настоящее время среди технологов и ученых-металлургов нет единого мнения ни в вопросе определения главного источника и механизма поступления кремния в металл, ни в решении задачи удаления избыточного кремния при производстве малокремнистых автолистовых сталей.

Среди зарубежных металлургических предприятий, близким по условиям производства к современным украинским заводам, наибольший опыт по производству малокремнистой автолистовой стали накоплен в России.

Так, учеными Магнитогорского государственного технического университета были проведены исследования поведения кремния при внепечной обработке указанных сталей в агрегате ковш-печь (АКП) Магнитогорского металлургического комбината [2]. Заметный прирост содержания

кремния при обработке стали в АКП авторы связывают с раскислением расплава алюминием и активизацией процесса алюминотермического восстановления кремния из (SiO_2).

На Новолипецком металлургическом комбинате также проводились исследования по оптимизации технологии производства малокремнистой стали, предназначенной для оцинкованного листа [3]. Авторы считают, что превышение регламентированной концентрации кремния, прежде всего, связано с его вводом с ферросплавами и предлагают проводить его окисление при обработке металла.

Особенности внепечной обработки малокремнистой, раскисленной алюминием конвертерной стали рассматривались и технологами Западносибирского металлургического комбината [4]. По мнению авторов, глубина раскисления шлака на малокремнистых сталях, требуемая для эффективной десульфурации, ограничена именно восстановлением кремния из (SiO_2) и возможностью превышения его содержания над требуемым в готовой стали. Рост концентрации кремния в металле связывают как с его приходом из ферросплавов, так и восстановлением из (SiO_2)

шлака при раскислении алюминием в АКП.

В исследованиях, проведенных на Алчевском металлургическом комбинате, отмечено, что другой фактор, влияющий на процесс восстановления кремния, — длительность ковшевой обработки. Для получения требуемого содержания серы в низкоуглеродистой стали плавку обрабатывают в течение более длительного времени, что приводит к увеличению содержания в ней кремния, восстановителем которого может быть углерод графитовых электродов. Таким образом, источником восстановления кремния из (SiO_2) может быть также реакция его карботермии [5].

Постановка задачи. Целью данного исследования является экспериментальная проверка теоретических предположений о возможности протекания в АКП процессов алюминио- и карботермического восстановления кремния из SiO_2 рафинировочного шлака, а также количественная оценка этих процессов.

Изложение материала и его результаты. Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные исследования, в ходе которых изучалось поведение кремния в системе металл-шлак при отсутствии электродугового нагрева. При таком условии появляется возможность разделить процессы алюминио- и карботермии кремния и оценить вклад каждого из них в общую величину прироста содержания кремния в металле.

При подготовке опытов десять образцов металла и шлака, отобранных в конце внепечной обработки малокремнистой автолитовой стали марки SAE 1006 в АКП, были помещены в специально подобранные алундовые тигли. Во всех опытах масса металла составила 160 г, а масса шлака 4 г, что соответствует соотношению масс металла и шлака в сталеразливочном ковше в реальных условиях в АКП ПАО «АМК» (кратность шлака 2,5), где толщина наводимого шлакового слоя поддерживается на 20–25% больше длины дуги для

обеспечения экономичной работы установки и снижения газопроницаемости шлака.

Металл и шлак нагревались в лабораторной криптоловой печи и выдерживались в расплавленном состоянии при температурах 1600–1680⁰С, характерных условиям внепечной обработки в АКП.

Для защиты металла и шлака от взаимодействия с окислительной средой окружающего воздуха тигли вводились в печь с помощью специальной оснастки, которая предусматривает подвод защитного газа (аргона) в полую огнеупорную подставку через патрубок, выполненный в подъемно-поворотном стенде печи и затем в жаровую трубу через сквозное отверстие в подставке. Отвод отходящих газов (аргона и продуктов горения криптола) обеспечивался с помощью вытяжного устройства печи.

В каждом из десяти проведенных опытов готовый расплав металла и шлака выдерживали в печи 20 минут, в течение которых проводили механическое перемешивание расплава огнеупорной алундовой палочкой. Это обеспечило усреднение расплава в пограничном слое между металлом и шлаком как при продувке аргоном в сталеразливочном ковше во время доводки стали в АКП.

После окончания опытов образцы металла и шлака охлаждали на воздухе, после чего проводили их химический анализ согласно стандартной методике. Полученный в результате исследования химический состав проб металла и шлака до и после проведения опытов приведен в табл. 1 и 2 соответственно.

На основании приведенных данных о химическом составе металла был отмечен незначительный прирост содержания кремния в стали (от 0,0009 до 0,0017%). Причем, как видно из табл. 1, он обусловлен только процессом алюминотермии кремния из кремнезема шлака, так как содержание углерода в металле осталось неизменным (0,036%), а содержание алюминия — уменьшилось (на 0,005–0,007%).

МЕТАЛУРГІЯ

Таблица 1 — Начальный и конечный химический состав проб металла

№ опыта	Компонент металла					
	C	Mn	Si	S	P	Al
Начальный, %	0,036	0,210	0,0090	0,011	0,007	0,024
Средний конечный, %	0,036	0,214	0,0105	0,010	0,007	0,018

Таблица 2 — Начальный и конечный химический состав проб шлака

№ опыта	Компонент шлака							
	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅
Начальный, %	0,93	8,12	56,15	5,90	0,31	28,07	0,49	0,03
Средний конечный, %	0,71	8,09	55,97	5,88	0,17	28,19	0,50	0,03

Расчет материального баланса опытов показал, что алюминий, растворенный в металле, израсходовался на восстановление оксидов железа, марганца и кремния, о чем свидетельствует как уменьшение их количества в покровном шлаке, так и увеличение количества (Al₂O₃) (табл. 1). Уменьшение содержания оксидов кальция и магния можно объяснить увеличением общей массы шлака (по данным материального баланса — на 0,3%) за счет прироста (Al₂O₃).

По результатам опытов с нагревом расплава металла и шлака в криптоловой печи (т.е. при отсутствии электродугового нагрева) среднее значение прироста содержания кремния в стали составило $\Delta Si_{Al} = 0,0015\%$ или 17% по массе.

Величина прироста содержания кремния на опытно-промышленных плавках малокремнистых автолистовых сталей с нагревом электрической дугой в АКП составляет $\Delta Si_{\Sigma} = 0,0131\%$ или 168% по массе. Результаты обработки паспортных данных этой группы плавок были приведены в работе [5].

Количество восстановленного в результате карботермии кремния ΔSi_C можно определить как разницу между общим количеством поступившего в металл кремния и количеством кремния, восстановленным в результате алюминотермии

$$\Delta Si_C = \Delta Si_{\Sigma} - \Delta Si_{Al} =$$

$$= 0,0131 - 0,0015 = 0,0116\%.$$

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что описанный ранее процесс алюминотермического восстановления кремния из шлака получает весьма слабое развитие (7–13% от общего количества восстановленного кремния), а основным источником восстановления кремния из шлака является процесс карботермии (87–93%), протекающий на границе раздела шлака и графитированных электродов АКП.

Для подтверждения этих данных были рассчитаны и сопоставлены доля шлака, который может участвовать в реакции карботермического восстановления кремния, и доля шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния.

Согласно стехиометрии реакции карботермии кремния, масса кремнезема, участвующего в восстановлении 0,0116% кремния, составляет $\Delta M_{SiO_2} = 74,6$ кг. В то же время, при массе шлака около 6000 кг в нем содержится 720 кг SiO₂ (12%). Таким образом, доля кремнезема, участвующего в реакции карботермии кремния, от общего количества (SiO₂) составляет 10,4%. Исходя из этого, можно предположить, что доля шлака, который может участвовать в реакции карботермического восстановления кремния, также составляет около 10%.

С другой стороны, по данным работы [6] для трехфазных систем нагрева можно рассчитать площадь горячей зоны в облас-

ти горения дуг, в которой существует перегрев (градиент температуры) расплава.

Градиент температуры между столбом дуги и основным объемом расплава в ковше в данном случае составит

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 6175 - 1600 = 4575 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где t_1 — температура столба дуги, $^\circ\text{C}$;
 t_2 — температура основного объема расплава в ковше, $^\circ\text{C}$.

Площадь горячей зоны равна

$$F = \frac{\pi}{4} (D_{\text{эл}} + 4l)^2 = \\ = \frac{\pi}{4} (0,45 + 4 \cdot 0,2)^2 = 1,23 \text{ м}^2,$$

где $D_{\text{эл}}$ — диаметр электрода, м; l — длина дуги, м.

Согласно проведенным термодинамическим расчетам, температура начала реакции карботермии кремния в условиях АКП составляет около 1900°C . Если в первом приближении принять линейное распределение температуры в горячей зоне, то площадь горячей зоны с градиентом температуры

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 6175 - 1900 = 4275 \text{ } ^\circ\text{C}$$

будет пропорциональна общей площади горячей зоны и составит $1,15 \text{ м}^2$. Тогда объем шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния, составит

$$V = Fh = 1,15 \cdot 0,2 = 0,23 \text{ м}^3,$$

где h — толщина слоя шлака, м.

Если объем шлака в ковше составляет в среднем $2,26 \text{ м}^3$, тогда доля шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния, составляет $10,2\%$, что достаточно хорошо согласуется с результатом лабораторного эксперимента.

Полученные в ходе эксперимента данные подтверждаются также балансом расходования графитированных электродов при внепечной обработке стали в АКП.

Расход электродов в АКП ПАО «АМК» составляет в среднем $0,241 \text{ кг/т}$ стали или $72,3 \text{ кг/плавку}$. При этом необходимо учитывать, что часть углерода электродов расходуется на науглероживание металла. Для малокремнистых автолистовых сталей SAE 1006 и 1008 величина прироста содержания углерода в металле за время внепечной обработки составляет $0,0024\%$ или $7,2 \text{ кг}$ (за вычетом углерода, поступающего в расплав с ферромарганцем).

Поскольку на период прироста содержания кремния в металле (по данным паспортов внепечной обработки) приходится около 50% времени электродугового нагрева, то и расход электродов в этот период равен 50% от общего расхода, т.е. 36 кг , из которых на науглероживание металла расходуется 50% от количества углерода, поступающего в металл, т.е. $3,6 \text{ кг}$. Таким образом, на процессы карботермического восстановления в шлаке расходуется $32,4 \text{ кг}$ углерода, а на восстановление из шлака $0,0116\%$ или $34,8 \text{ кг}$ кремния согласно стехиометрии реакции карботермии кремния требуется $29,8 \text{ кг}$ углерода. Остальное количество углерода ($2,6 \text{ кг}$), вероятно, расходуется на восстановление металлов из других оксидов шлака.

Исключить хотя бы один из главных факторов (поступление кремнезема в рафинировочный шлак, электродуговой нагрев, интенсивное перемешивание металла), влияющих на процесс карботермического восстановления кремния, при существующих технологических условиях внепечной обработки малокремнистых автолистовых сталей в АКП и без значительных капитальных затрат не представляется возможным.

В связи с этим, разработанная автором технология проведения процесса силикотермии магния для удаления уже восстановленного и перешедшего в сталь кремния [7] является как технологически, так и экономически наиболее целесообразным путем решения задачи обеспечения регламентированного содержания кремния в малокремнистых автолистовых сталях.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, наличие при доводке стали высокотемпературной области электрической дуги и необходимого количества углерода в качестве восстановителя обеспечивает протекание процесса карботермического восстановления кремния. Установлено, что количество кремния, вос-

становливаемого из шлака процессом алюминотермии, составляет 7–13% от общего количества восстановленного кремния, а процессом карботермии — 87–93%. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование технологии доводки автолистовых сталей в АКП с использованием полученных результатов.

Библиографический список

1. Пройдак Ю. С. Технология выплавки и внепечной обработки особонизкоуглеродистых сталей для производства высокопластичной стали / Ю. С. Пройдак // *МеталлИнформ*. — 2007. — № 26–27. — С. 30.
2. Валиахметов А. Х. Особенности изменения содержания кремния в малоуглеродистой стали во время ковшевой обработки / А. Х. Валиахметов // *Сталь*. — 2004. — № 7. — С. 22–23.
3. Драгман А. И. Оптимизация технологии выплавки низкокремнистой и малосернистой стали / А. И. Драгман // *Сталь*. — 2005. — № 7. — С. 37–38.
4. Носов Ю. Н. Особенности десульфурации на АКП низкокремнистой, раскисленной алюминием конвертерной стали / Ю. Н. Носов // *Сталь*. — 2009. — № 2. — С. 17–19.
5. Кузнецов Д. Ю. Исследование поведения кремния при производстве малоуглеродистой стали / Д. Ю. Кузнецов, С. В. Куберский, Д. Б. Васильев, Д. В. Переяслов, А. С. Сергухин, А. В. Пациенко // *Сб. науч. трудов ДонГТУ*. — Алчевск: ДонГТУ, 2007. — № 23. — С. 269–274.
6. Леушин А. И. Дуга горения / А. И. Леушин. — М.: *Металлургия*, 1973. — 240 с.
7. Кузнецов Д. Ю. Разработка технологии внепечной обработки автолистовых сталей с удалением кремния / Д. Ю. Кузнецов, С. В. Куберский, А. И. Ямполь // *Сб. науч. трудов ДонГТУ*. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — № 33. — С. 208–214.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Новохатским А. М., д.т.н., проф. ДонНТУ Смирновым А. Н.

Статья поступила в редакцию 16.06.14.

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

ВІДНОВЛЕННЯ КРЕМНІЮ В СИСТЕМІ МЕТАЛ-ШЛАК ПІД ЧАС ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ МАЛОКРЕМЕНИСТОЇ СТАЛІ В АКП

Приведені результати лабораторних експериментів по дослідженню можливості протікання в умовах агрегату ківш-піч процесів алюміно- і карботермічного відновлення кремнію з SiO₂ рафінувального шлаку. Визначена доля кремнію, відновлюваного з кремнезему шлаку при отриманні в агрегаті ківш-піч низьковуглецевої малокременистої розкисленої алюмінієм сталі, яка для процесу карботермії кремнію вуглецем графітованих електродів складає 87–93%, а для процесу алюмініотермії кремнію алюмінієм, розчиненим в металі, – 7–13%.

Ключові слова: *кремній, малокремениста сталь, агрегат ківш-піч, шлак, карботермія, алюмініотермія.*

Kuznetsov D. Y. Candidate of Technical Sciences (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

SILICON RECONDITIONING IN METAL-SLAG SYSTEM UNDER SECONDARY REFINING OF LOW-SILICA STEEL IN LADLE FURNACE

The results of laboratory experiments as to the research of possibility of aluminum and carbothermic silicon reconditioning from SiO₂ (refining slag) in ladle furnaces are introduced. The proportion of silicon, reconditioned from silica slag, obtained in ladle furnace from low-silica and carbon aluminum deoxidized steel, which for the process of karbothermity of silicon by carbon of graphite electrodes is 87–93%, and for the process of aluminothermy of silicon by aluminum dissolved in the metal – 7–13% is determined.

Key words: *silicon, low-silica steel, ladle furnace, slag, carbothermy, aluminothermy.*