

УДК 669.046.552.5

## НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДИФФУЗИОННОГО РАСКИСЛЕНИЯ В АГРЕГАТЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

В. А. ЧАЙКИН, А. В. ЧАЙКИН, А. Д. КАСИМГАЗИНОВ, П. О. БЫКОВ\*

*Исследована новая раскислительная смесь, обладающая уникальными физико-механическими, технологическими и функциональными свойствами, отличительным признаком которой является дисперсность компонентов. Повышение эффективности раскисления и десульфурации стали происходит в результате существенного увеличения в системе числа активных центров реагирующих частиц, межфазной поверхности и принудительного перемешивания шлаков. Процессы раскисления и десульфурации проводили в агрегате комплексной обработки сталей. В качестве исследуемого металла использовали стали 25Г2С, 35ГС, 65Г и 70Г. Установлено, что при применении новой смеси концентрации FeO в шлаках снизились на 29,3 %, MnO — на 60,2 %, а коэффициент десульфурации стали повысился с 25,48 до 41,33 %. Расход ферросплавов снизился с 1 до 0,41 кг/т. Время восстановительного периода сократилось на 10 мин. Ожидаемый экономический эффект составляет свыше 3 млн. рублей.*

*Ключевые слова:* сталь, шлак, модифицирование, диффузионное раскисление, десульфурация, статистический анализ.

### Введение

Наибольшее распространение в мире получают агрегаты, работающие со стратегией минимизации затрат, что обычно характерно при производстве стали массового сортамента [1]. Практическая реализация этой схемы оказалась возможной в последнее десятилетие благодаря большому прогрессу в области технологии электроплавки (уменьшение цикла плавки до 30–60 мин [2]. В течение последних двух десятилетий также непрерывно совершенствовались агрегаты комплексной обработки сталей (АКОС) в конструкционном и технологическом плане [3]. Это позволило достичь весьма высоких показателей качества стали, а также относительно энерго- и ресурсосбережения в технологической системе ее выплавки и разлива [4]. Кроме того, на практике убедительно доказана высокая кон-

курентоспособность АКОС практически для всего диапазона вместимости сталеразливочных ковшей: от 15 до 350 т [5]. В состав АКОС входят средства для перемешивания металла инертным газом, система подачи ферросплавов и материалов для рафинирования стали в ковше. В настоящее время непрерывный ввод различных веществ (углерода, раскислителей, модификаторов) проводят с применением порошковой проволоки при помощи специального трайб-аппарата, состоящего из подающего и разматывающего устройств.

Сталеплавильный завод ПФ ТОО «КАСТИНГ», Павлодар, Казахстан, использует преимущества АКОС при производстве строительной арматуры диаметром 12–32 мм из стали 25Г2С, 35ГС, шаров стальных мелющих диаметром 40–100 мм из сталей 65Г и 70Г, а также непрерывнолитых квадратных заготовок для дальнейшего передела сечением 150×150 мм из сталей ст3пс/3сп, ст5пс/5сп, ст20 и ст80. Заготовки получают на установке непрерывной разлива стали (УНРС). Выплавка стали осуществляется на комплексе из дуговой сталеплавильной печи ДСП30-2Н и АКОС емкостью 30 т. В ДСП происходят расплавление шихты и окислительный период, и получают полупродукт. Восстановительный период и доводку металла по химическому составу производят в АКОС. Во время обработки стали через днище ковша осуществляется продувка металла инертным газом (аргоном) для перемешивания металла с целью усреднения его по химическому составу и температуре и выведению неметаллических включений из металла.

\* ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия:

докт. техн. наук В. А. Чайкин, профессор кафедры «Технологии металлургических и литейных процессов»;

Российская ассоциация литейщиков, Смоленское региональное отделение, Сафонов, Россия:

канд. техн. наук А. В. Чайкин, технический директор;

ПФ ТОО «Кастинг», Павлодар, Республика Казахстан:

А. Д. Касимгазинов, главный технолог;

Павлодарский государственный университета им. С. То-райгырова, Павлодар, Республика Казахстан:

канд. техн. наук П. О. Быков, проректор по академической работе;

эл. почта: sro\_ral@mail.ru

© Чайкин В. А., Чайкин А. В., Касимгазинов А. Д., Быков П. О., 2018

Целью данной работы является исследование и внедрение прогрессивной дисперсной смеси для диффузионного раскисления стали для повышения эффективности процесса раскисления, десульфурации и уменьшения времени восстановительного периода в АК ОС, что является актуальной задачей.

В связи с этим проведены работы по испытанию и внедрению раскислителя диффузионного алюмосодержащего (РДА) для сталей, производимого ООО «Металлург» Смоленского регионального отделения Российской ассоциации литейщиков по ТУ 0826-003-47647304-2001. Раскислитель применили вместо традиционных смесей, состоящих из извести, ферросилиция ФС65 и плавикового шпата. РДА представляет собой смесь порошков углерод-, кремний- и алюмосодержащих материалов. Основное отличие порошков заключается в том, что они получены физико-химическим путем и обладают высокой дисперсностью, что придает смеси новые свойства [6, 7]. Кроме того, в состав смеси введено оптимальное количество поверхностно активных веществ, состоящих из кальций-стронциевого карбоната, соединений калия и натрия, которые придают ей жидкоподвижность и еще больше активизируют [8, 9].

### Теоретическое обоснование

Дисперсные и ультрадисперсные материалы все чаще применяют в производственных условиях для интенсификации процессов [10, 11]. Преимущества измельчения материалов можно увидеть на примере карбоната кальция, который диссоциируя, дополнительно перемешивает и вспенивает шлак, повышает его основность. Взаимодействие карбоната кальция со шлаком протекает на поверхности раздела фаз. При измельчении твердого тела увеличивается его общая поверхность при неизменном суммарном объеме и массе, т. е. по мере роста дисперсности увеличивается удельная поверхность системы. Количественные изменения приводят к возникновению нового качества. С физико-химической точки зрения важнейшим следствием увеличения дисперсности является возрастание удельной реакционной способности твердых тел, называемой часто активностью. Оценим изменение процесса реакционной способности порошков с различной дисперсностью.

Рассмотрим два монодисперсных порошка  $\text{CaCO}_3$ , состоящих из сферических частиц с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Исходя из того, что мольный объем  $V = M/d$ , и считая, что все частицы представляют собой сферы одинакового радиуса, найдем количество частиц, содержащихся в одном моле рассматриваемых порошков:

$$n_1 = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi dr_1^3}; \quad (1)$$

$$n_2 = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi dr_2^3}, \quad (2)$$

где  $M$  — молекулярная масса;  $d$  — плотность порошка.

Рассчитаем суммарную площадь поверхности частиц радиусами  $r_1$  и  $r_2$  и соответствующую свободную поверхностную энергию:

$$S_1 = \frac{4\pi r_1^2 V}{\frac{4}{3}\pi r_1^3} = 3\frac{V}{r_1}; \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{3\sigma V}{r_1}; \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{4\pi r_2^2 V}{\frac{4}{3}\pi r_2^3} = 3\frac{V}{r_2}; \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{3\sigma V}{r_2}, \quad (6)$$

где  $S_1$  — площадь поверхности частиц радиусом  $r_1$  в объеме  $V$ ;  $S_2$  — площадь поверхности частиц радиусом  $r_2$  в объеме  $V$ .

Различная активность порошков реализуется как разность величин их свободной поверхностной энергии в виде изотермической разности химических потенциалов. Таким образом, в расчете на один грамм моль растворов

$$\mu_1 - \mu_2 = \Delta \mu = \sigma(S_1 - S_2) = \sigma\left(\frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2}\right), \quad (7)$$

где  $\mu$  — химический потенциал компонентов.

Для первого порошка приближенно можно записать

$$\mu_1 = \mu_0 + RT \ln a_1, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  — химический потенциал компонентов в стандартном его состоянии;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура, К;  $a$  — активность.

Соответственно для другого порошка

$$\mu_2 = \mu_0 + RT \ln a_2. \quad (9)$$

Тогда

$$\mu_1 - \mu_2 = \Delta \mu = RT \ln \frac{a_1}{a_2}. \quad (10)$$

Приравняв правые части выражений (7) и (10), получаем

$$RT \ln \frac{a_1}{a_2} = \sigma\left(\frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2}\right);$$

$$\ln \frac{a_1}{a_2} = \frac{3V\sigma}{RT}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

или

$$\ln \frac{a_1}{a_2} = \frac{3M\sigma}{RTd} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (11)$$

При диссоциации порошков разность величин их свободной поверхностной энергии реализуется в виде изотермической работы диссоциации. Таким образом, в расчете на один грамм моль растворов имеем

$$A_1 - A_2 = \Delta A = \sigma (S_1 - S_2) = \sigma \left( \frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2} \right). \quad (12)$$

С другой стороны, для карбоната с радиусом частиц  $r_1$  приближенно можно записать

$$A_1 = A_0 + RT \ln K_{p1}, \quad (13)$$

а для карбоната с радиусом частиц  $r_2$

$$A_2 = A_0 + RT \ln K_{p2}, \quad (14)$$

тогда

$$A_1 - A_2 = \Delta A = RT \ln \frac{K_{p1}}{K_{p2}}. \quad (15)$$

Приравняв правые части выражений (12) и (15), получаем

$$RT \ln \frac{K_{p1}}{K_{p2}} = \sigma \left( \frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2} \right);$$

$$\ln \frac{K_{p1}}{K_{p2}} = \frac{3V\sigma}{RT} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

или

$$\ln \frac{K_{p1}}{K_{p2}} = \frac{3M\sigma}{RTd} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (16)$$

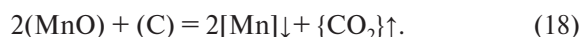
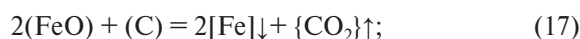
Из уравнений (12) и (16) следует, что при уменьшении размеров частиц твердого тела активность системы и процесс диссоциации карбонатов активизируются. В общем случае можно сделать вывод, что чем больше дисперсность системы, тем выше ее реакционная способность или физико-химическая активность.

Основная и важнейшая особенность дисперсного состояния заключается в том, что значительная доля свободной энергии системы сосредоточена в межфазных поверхностных слоях. Избыток свободной энергии делает дисперсные системы термодинамически неустойчивыми. Для них характерны самопроизвольные процессы, стремящиеся снизить этот избыток различными путями. Таким образом, избыток свободной энергии будет потрачен на изменение химического состояния вещества, т. е. на диссоциацию карбонатов. Диссоциация будет максимально облегчена и произойдет максимально быстро.

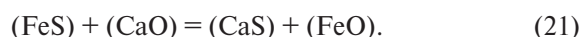
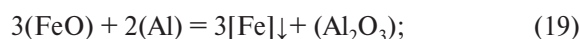
Путем аналогичных расчетов можно сделать вывод о влиянии диспергирования на реакционную способность или физико-химическую активность карбоната стронция, углерода, кремния, а соответ-

ственно, и на кинетические характеристики реакции раскисления.

При подаче РДА на шлак дисперсные компоненты смеси способствуют равномерному распределению материала по поверхности шлака за короткой промежуток времени. Карбонаты кальция и стронция, входящие в состав смеси, мгновенно диссоциируют на CaO, SrO и CO<sub>2</sub>. Оксиды Ca и Sr повышают основность и сульфидоёмкость шлака. CO<sub>2</sub> способствует перемешиванию РДА со шлаком. Входящие в состав РДА соединения натрия, калия и оксиды алюминия способствуют разжижению шлака и делают его реакционноспособным. Кроме того, дисперсный углеродсодержащий материал дополнительно вспенивает шлак за счет протекающих реакции восстановления оксидов из шлака по реакциям



Вспененный жидкоподвижный шлак экранирует дуги, способствует быстрому нагреванию шлака и металла [12]. Таким образом, создаются идеальные условия для дальнейшего протекания реакций восстановления оксидов из шлака присутствующими в РДА алюминием и кремнием, а также реакций десульфурации:



В результате сокращается время восстановительного периода, экономится электроэнергия. Образующийся оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> продолжает разжижать шлаки и повышать их основность. В результате раскисления оксиды железа и марганца восстанавливаются в шлаке и согласно закону распределения переходят в металл, а из металла в шлак уходят FeO и MnO, где восстанавливаются РДА. Сульфиды также переходят в шлак согласно закону распределения. Таким образом, сталь оказывается с более низкими содержаниями оксидов и серы. За счет уменьшения в стали неметаллических включений и оксидных плен повышается жидкотекучесть расплава.

#### Методика исследований

Исследования проводили на сталях 25Г2С, 35ГС, 65Г, 70Г, а также ст3пс/3сп, ст5пс/5сп, ст20 и ст80, выплавленных в электродуговых печах ДСП30-Н2 с доводкой расплава по качеству в АКЭС емкостью 30 т. Образцы для определения

Таблица 1.  
Результаты химического анализа шлаков плавки № 3460522

№ пробы	Химический состав шлаков, %							
	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Основность	Σ
До РДА	4,4	23,3	1,6	48,6	6,4	11,6	2,1	96,1
После РДА	0,6	26,1	2,2	56,7	5,3	1,1	2,1	91,0

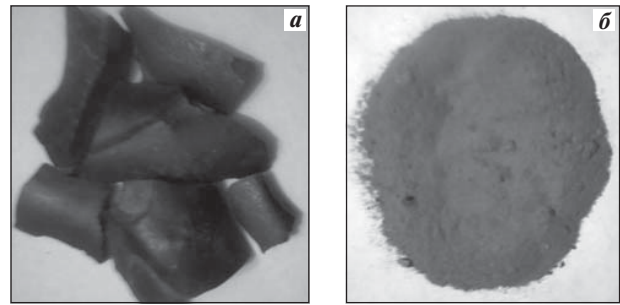
физико-механических свойств сталей и шлаков брали непосредственно из АКОС. Диффузионное раскисление в АКОС проводили раскислительной смесью РДА. Раскисление проводили после взятия второй пробы на химический состав металла за 20–25 мин до отдачи ковша с металлом на УНРС. В ковш присаживали 10 кг РДА. Химический состав стали определяли на спектрометре QLS-750. В качестве образцов использовали пятакковые пробы, получаемые с использованием разовых пробоотборников. Шлаки отбирали ложкой в АКОС и выливали на металлическую плиту. Качество шлаков анализировали визуально и химическими методами. В работе широко применяли статистическую обработку результатов исследований с использованием компьютерной программы STATISTICS & ANALISIS [13, 14].

### Обсуждение результатов

Провели 90 экспериментальных плавки сталей с использованием РДА. Рациональной присадкой оказалось 10 кг смеси. После присадки РДА происходило интенсивное раскисление и разжижение шлака, сопровождающееся его вспениванием, о чем свидетельствовала стабилизация горения дуг с равномерным и тихим гудением. После окончания реакции визуально шлак был жидкоподвижным и реакционноспособным. Перед отдачей ковшей на УНРС отбирали пробы шлака на анализ. Шлак был белого цвета и в процессе охлаждения рассыпался в белый порошок (рисунок, б). Пробы шлака одной из плавки (№ 3460522) приведены на рисунке и в табл. 1.

Как видно из табл. 1, шлак до обработки РДА содержал большое количество FeO (4,4 %) и MnO (11,6 %), чем объясняется его черный цвет (см. рисунок, а). После обработки шлака РДА содержание FeO и MnO в шлаке резко уменьшилось, что свидетельствует о высокой эффективности РДА.

Такая тенденция прослеживалась во всех экспериментальных плавках. Провели статистическую обработку химических составов шлаков экспериментальных и рядовых плавки. Результаты компонентных составов



Шлак до раскисления РДА (а) и после (б)

шлаков, полученных с применением традиционных смесей для диффузионного раскисления стали и с применением РДА, приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, концентрации FeO в шлаках снизились на 29,3 %, а MnO — на 60,2 %. Соответственно, концентрации этих оксидов уменьшаются и в металле, что повысит механические свойства сталей. Намечается тенденция к экономии марганецсодержащих ферросплавов. Кроме того, применение РДА способствует повышению основности шлаков, снижает концентрации FeO, что положительно сказывается на процессе десульфурации расплава по реакции (21) [15, 16]. Известно, что для успешной десульфурации стали по реакции (15) необходимы высокие основность, жидкоподвижность и реакционная способность шлаков, а также высокая температура процесса и низкая концентрация FeO [17, 18]. Все эти условия создает применение РДА в качестве диффузионного раскислителя. Это подтверждено статистической обработкой содержания серы в сталях. Анализировали количество серы в начальный и конечный моменты обработки стали.

Таблица 2.  
Результаты статистической обработки химических составов шлаков

	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия S <sup>2</sup>	Среднеквадратическое отклонение S	Коэффициент вариации, %
FeO	1,35833 1,91667	0,30000 0,60000	3,00000 4,40000	0,686288 0,957879	0,828425 0,978713	60,7 50,7
SiO <sub>2</sub>	24,90833 27,29167	22,10000 25,20000	26,70000 29,50000	1,728106 1,824470	1,314574 1,350729	5,2 4,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,88333 1,48333	1,40000 1,20000	2,20000 1,70000	0,056061 0,019697	0,236771 0,140346	12,2 9,4
CaO	54,50833 49,38333	51,70000 46,00000	57,50000 51,40000	4,395379 2,617879	2,096516 1,617986	3,8 3,2
MgO	5,65000 7,70000	3,80000 5,50000	6,70000 11,90000	0,899091 4,007273	0,948204 2,001817	16,8 25,9
MnO	1,95000 4,90833	0,80000 2,10000	3,00000 9,00000	0,520909 4,368106	0,721740 2,090001	36,9 42
Основность	2,19167 1,81667	2,00000 1,70000	2,60000 2,00000	0,031742 0,008788	0,178164 0,093744	8,6

Примечание. В числителе указаны результаты плавки с применением раскислительных смесей РДА, в знаменателе — с традиционными смесями.

Таблица 3.  
Результаты десульфурации опытных и рядовых плавков

	Среднее значение	Минимум	Максимум	Средне-квадратичное отклонение S	Дисперсия S <sup>2</sup>	Коэффициент вариации V, %
Содержание серы до десульфурации, %	0,0433 0,0412	0,031 0,030	0,063 0,053	0,0001 0,0000	0,0071 0,0060	16,48 14,76
Содержание серы после десульфурации %	0,0251 0,0307	0,009 0,013	0,041 0,045	0,0000 0,0000	0,0063 0,0066	15,33 24,38

Примечание. В числителе указаны результаты плавков с применением раскислительных смесей РДА, в знаменателе — с традиционными смесями.

Полученные результаты сравнивали с данными, полученными при статистической обработке рядовых плавков. Результаты обработки представлены в табл. 3.

Согласно данным табл. 3, средние начальные значения содержания серы в опытных плавках выше, чем в рядовых. При этом конечные концентрации серы больше в рядовых плавках, чем в опытных. Минимальное содержание серы в опытных плавках снизилось до 0,009 %, а максимальное почти достигло верхнего контрольного предела. Повысился также коэффициент десульфурации — с 25,48 до 41,33 %. В экспериментальных плавках десульфурация протекает более стабильно.

Таким образом, подтверждается повышение эффективности и стабилизации удаления серы из стали.

В ходе проведенных экспериментов установлено, что применение РДА не требует дополнительной подготовки к использованию. Смесь поступает к заказчику в готовом к употреблению виде в пакетах по 10 кг. Применение РДА позволяет облегчить ручной труд сталеваров при проведении диффузионного раскисления; экономично и равномерно распределить смесь по поверхности шлака и наладить контроль за рациональным расходом материала и снизить время восстановительного периода на 10 мин. Это является важным преимуществом материала. Шлак после обработки РДА остается жидким. Разливка проходит в штатном режиме. С применением РДА было выплавлено, обработано и разлито 2704,82 т заготовок. Углеродсодержащий материал и ФС65 исключили из процесса диффузионного раскисления. Расход плавикового шпата был уменьшен на 50 %. Средний расход РДА за данный период составил 0,41 кг/тн (для сравнения: расход ФС65 для диффузионного раскисления составляет 1 кг/тн).

На основании проведенных опытно-промышленных испытаний принято решение внедрить процесс диффузионного раскисления РДА в производство. Ожидаемый экономический эффект составляет около 3 млн. руб.

## Выводы

1. Исследована и внедрена в производство новая прогрессивная раскислительная смесь, обладающая уникальными физико-механическими, технологическими и функциональными свойствами, отличительным признаком которой является дисперсность компонентов. Преимущества диспергирования компонентов смеси теоретически обоснованы и практически

подтверждены.

2. Установлено, что внедрение разработанной раскислительной смеси позволило резко повысить эффективность раскисления и десульфурации стали за счет существенного увеличения в системе числа активных центров реагирующих частиц и межфазной поверхности, принудительного перемешивания шлаков из-за диссоциации карбонатов. Концентрации FeO в шлаках снизились на 29,3 %, а MnO — на 60,2 %. Повысился коэффициент десульфурации стали с 25,48 до 41,33 %. Кроме того, процесс десульфурации существенно стабилизировался. Время восстановительного периода уменьшено на 10 мин.

3. Выявлены преимущества смеси, заключающиеся в том, что ее применение не требует дополнительной подготовки к использованию. Смесь фасуется в пакеты по 10 кг, что позволяет снизить трудоемкость ручного труда сталеваров при проведении диффузионного раскисления стали, улучшает экологические условия труда в цехе, облегчает контроль за ее рациональным использованием. В результате внедрения уменьшился расход ферросплавов с 1 до 0,41 кг/т. Ожидаемый экономический эффект составляет свыше 3 млн. руб. ЧМ

## Библиографический список

1. Сталь на рубеже столетий / под научной ред. Ю. С. Карабасова. — М.: «МИСиС», 2001. — 664 с.
2. Золотухин В. И., Гордеев Е. И., Провоторов Д. А., Головки А. Г. Современные сталеразливочные системы для литейных и машиностроительных производств // Литейщик России. 2016. № 9. С 15–17.
3. Dorantes M., Noradino P., Maximiliano M. G. Type-2 fuzzy logic systems for temperature evaluation in ladle furnace // IEEE Latin America Transactions. 2016. Vol. 14, Iss. 8. P. 3914–3920.
4. Attila G. C. Refining steel in an induction ladle furnace // Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. 2015. Vol. 13, Iss. 3. P. 197–200.
5. Severstal plans upgrades to steel works, orders new ladle furnace/ Iron & Steel Technology. 2016. Vol. 13, Iss. 4. P. 8.
6. Чайкин В. А., Чайкин А. В., Колколова А. В. и др. Совершенствование технологии выплавки сталей в ООО «Самарский завод технического литья» с применением дисперсных материалов // Тр. XI съезда литейщиков России. — Екатеринбург. 16–20 сентября 2013. С. 78–83.
7. Чайкин В. А., Чайкин А. В. Рафинирование сталей и чугунов дисперсными модификаторами при выплавке в дуговых и индукционных электропечах // Тр. XII съезда литейщиков России. — Ниж-

- ний Новгород, 2015. С. 155–159.
8. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Пивоварова К. Г. и др. Флюсы для электрошлакового переплава конструкционных сталей // *Электротехнология*. 2017. № 4. С. 13–19.
  9. Чайкин В. А., Чайкин А. В. Применение диффузионных раскислительных и рафинирующих смесей при выплавке сталей и чугунов в электродуговых печах // *Тр. международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра» / под ред. Г. А. Косникова* — СПб. : Культ-информ-пресс, 2014. С. 161–164.
  10. Hepuț T., Ardelean E., Socalici A., Osaci M., Ardelean M. Steel deoxidation with synthetic slag // *Metalurgia International*. 2010. Vol. 15, Iss. 7. P. 22–28.
  11. Жеребцов С. Н., Чернышев Е. А. Влияние модифицирования ультрадисперсными порошковыми комплексами на структуру сплавов // *Тр. VIII Междунар. науч.-практич. конференции «Прогрессивные литейные технологии»*. 16–20 ноября 2015, «МИСиС», С. 142–145.
  12. Кожухов А. А. Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП // *Электротехнология*. 2015. № 6. С. 3–9.
  13. Сидняев Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для бакалавров. — М. : Юрайт, 2015. — 219 с.
  14. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. — М. : Юрайт, 2014. — 495 с.
  15. Guo J., Cheng S., Cheng Z. Characteristics of Deoxidation and Desulfurization during LF Refining Al-killed Steel by Highly Basic and Low Oxidizing Slag // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21, Iss. 2. P. 166–173.
  16. Турсунов Н. К., Саноккулов Э. А., Семин А. Е. Исследование процесса десульфурации конструкционной стали с использованием твердых шлаковых смесей и РЗМ // *Черные металлы*. 2016. № 4. С. 32–37.
  17. Козлов Л. Я., Колокольцев В. М., Вдовин К. Н. и др. Производство стальных отливок : учебник для вузов / под ред. Л. Я. Козлова. — М. : «МИСиС», 2003. — 352 с.
  18. Putan V., Putan A., Ardelean E. Influence of the addition of a reducing mixture slag and duration of treatment on the desulphurization and deoxidation efficiency // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 144–148.

“CHERNYE METALLY”, 2018, № 9, pp. 6–11

THE NEW MATERIAL FOR STEEL DIFFUSIVE DEOXIDIZING IN THE UNIT FOR COMPLEX STEEL TREATMENT

V. A. Chaikin<sup>1</sup>, Dr. Eng., Prof.  
 A. V. Chaikin<sup>2</sup>, Cand. Eng., Technical director  
 A. D. Kasimgazinov<sup>3</sup>, Chief technologist  
 P. O. Bykov<sup>4</sup>, Cand. Eng., Vice rector on academic work

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk state technical university (Magnitogorsk, Russia)

<sup>2</sup> Smolensk regional branch of the Russian association of foundrymen (Smolensk, Russia)

<sup>3</sup> “Casting” LLC (Pavlodar, Kazakhstan)

<sup>4</sup> Toraygirov Pavlodar state university (Pavlodar, Kazakhstan)

E-mail: sro\_ral@mail.ru; chaika1983@inbox.ru;  
 kasimgazinov@pf.casting.kz; bykov\_petr@mail.ru

**Abstract:** Efficiency of diffusive steel deoxidizing by dispersing mixtures has been proven theoretically and confirmed in comparison with traditional mixtures. Deoxidizing and desulfurization processes were conducted in the units for complex steel treatment. Steel grades 25G2S (25Г2С), 35GS (35ГС), 65G (65Г), 70G (70Г) were used as a research material. The diffusive deoxidizer RDA presented by a mixture of carbon and silicon powders, as well as aluminium-containing materials was used to improve the deoxidizing efficiency. These powders have the especial properties, the main of which is their high dispersity, which brings new features to the mixture. RDA usage does not need any additional preparation. The mixture is packed in plastics bags in the amount of 10 kg each, which allows to decrease the amount of steelmakers' hand labor and recovering period time by 10 minutes. RDA usage finalized in lowering of FeO concentration in a slag by 29.3% and MnO — by 60.2%, while desulfurization coefficient increased from 25.48 to 41.33%. The amount of used ferroalloys and fluorspar decreased by half. The expected economic effect is more than 3 million rubles.

**Key words:** steel, slag, complex steel treatment, statistical processing, modifying, diffusive deoxidizing, powder mixtures.

**References:**

1. Steel at the turn of the century. Under scientific edition of Karabassov Yu. S. Moscow: “MISiS”, 2001. 664 p.
2. Zolotukhin V. I., Gordeev E. I., Provotorov D. A., Golovko A. G. State-of-the-art steel pouring systems for foundries and machine building plants. *Liteyshchik Rossii*. 2016. No. 9. pp. 15–17.
3. Dorantes M., Noradino P., Maximiliano M. G. Type-2 fuzzy logic systems for temperature evaluation in ladle furnace. *IEEE Latin America Transactions*. 2016. Vol. 14, Iss. 8. pp. 3914–3920.

4. Attila G. C. Refining steel in an induction ladle furnace. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2015. Vol. 13, Iss. 3. pp. 197–200.
5. Severstal plans upgrades to steel works, orders new ladle furnace. *Iron & Steel Technology*. 2016. Vol. 13, Iss. 4. p. 8.
6. Chaykin V. A., Chaykin A. V., Kolkolova A. V. et al. Improvement of the technology for melting steels in the “Samara Plant for technical castings” company using disperse materials. *Proceedings of the XI Congress of Russia's foundry workers*. Yekaterinburg. 16–20 September 2013. pp. 78–83.
7. Chaykin V. A., Chaykin A. V. Refining of steels and iron by disperse modifies during melting in electricarc and induction furnaces. *Proceedings of the XII Congress of Russia's foundry workers*. Nizhny Novgorod. 2015. pp. 155–159.
8. Vdovin K. N., Feoktistov N. A., Pivovarova K. G. et al. Fluxes for electroslog remelting of structural steels. *Elektrometallurgiya*. 2017. No. 4. pp. 13–19.
9. Chaykin V. A., Chaykin A. V. Application of diffusion deoxidizing and refining mixtures during melting steels and irons in electric arc furnaces. *Proceedings of International scientific and practical conference: Foundry today and tomorrow*. Edited by Kosnikov G. A. St. Petersburg: Kult-inform-press. 2014, pp. 161–164.
10. Hepuț T., Ardelean E., Socalici A., Osaci M., Ardelean M. Steel deoxidation with synthetic slag. *Metalurgia International*. 2010. Vol. 15, Iss. 7. pp. 22–28.
11. Zherebtsov S. N., Chernyshev E. A. Effect of modification by ultra-dispersed powder complexes on alloy structure. *Proceedings of XIII International scientific and practical conference “Advanced foundry technologies”*. 16 – 20 November 2015, “MISiS”, pp. 142–145.
12. Kozhukhov A. A. Estimation of electric arcs available heat factor during melting under foamed slag in the state-of-the art EAFs. *Elektrometallurgiya*. 2015. No. 6. pp. 3–9.
13. Sidnyaev N. I. Probability theory and mathematical statistics: tutorial for bachelors. Moscow: Yurayt, 2015. 219 p.
14. Sidnyaev N. I. The theory of planning an experiment and analysis of statistical data. Moscow: Yurayt, 2014. 495 p.
15. Guo J., Cheng S., Cheng Z. Characteristics of Deoxidation and Desulfurization during LF Refining Al-killed Steel by Highly Basic and Low Oxidizing Slag. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21, Iss. 2. pp. 166–173.
16. Tursunov N. K., Sanokulov E. A., Semin A. E. Study of desulfurization process of structural steel using solid slag mixtures and rare earth metals. *Chernye metally*. 2016. No. 4. pp. 32–37.
17. Kozlov L. Ya., Kolokoltsev V. M., Vdovin K. N. et al. Production of steel castings: tutorial. Edited by Kozlov L. Ya. Moscow: “MISiS”, 2003. 352 p.
18. Putan V., Putan A., Ardelean E. Influence of the addition of a reducing mixture slag and duration of treatment on the desulphurization and deoxidation efficiency. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. pp. 144–148.