

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.94

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАЛИ 110Г13Л, ВЫПЛАВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАТОРОВ И РАСКИСЛИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Чайкин А.В.¹, Чайкин В.А.¹, Лозов В.С.², Касимгазинов А.Д.³, Карман Ю.В.³, Быков П.О.⁴¹ ООО «Металлург», Смоленское региональное отделение Российской ассоциации литейщиков, Сафоново, Россия² ПАО «Михайловский ГОК», Железногорск, Россия³ ПФ ТОО «Кастинг», Павлодар, Республика Казахстан⁴ Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, Павлодар, Республика Казахстан

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы). В статье описаны особенности и потенциальные преимущества разработанного диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА, применение которого позволяет достигнуть широкого дополнительного комплекса эксплуатационных характеристик отливок, а также уменьшить время восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. На примере внедрения разработанной смеси в ПАО «Михайловский ГОК» с экономическим эффектом свыше 3 млн руб. показана актуальность работы. **Цель работы.** Совершенствование технологического процесса восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. **Используемые методы.** В работе широко применяли статистическую обработку результатов с использованием компьютерной программы STATIS-TICS & ANALYSIS. Уровень значимости для расчетов принимали равным 0,05. Определяли средние арифметические значения химического состава металла и шлаков, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность. Чем меньше вариации колеблются вокруг средней, тем она более надежна. О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака. Последний рассчитывается как отношение среднего квадратичного отклонения к средней арифметической. **Новизна.** Особенность разработанной смеси заключается в том, что компоненты в ней находятся в высокодисперсном состоянии. Резкое увеличение удельной поверхности частиц смеси предполагает существенную интенсификацию процесса восстановления оксидов. Это позволяет резко снизить время восстановительного периода плавки при одновременном повышении эффективности процесса. Применен еще один путь интенсификации раскисления – быстрое покрытие поверхности шлака раскислительной смесью. Эту задачу решают соединения натрия и калия, которые делают смесь жидкоподвижной и способствуют ее быстрому растеканию по поверхности шлака. **Результат:** в статье приведено сравнение результатов эффективности рафинирования металла модификатором L-Cast® 5,3 и высокодисперсным диффузионным раскислителем алюмосодержащим РДА, разработанным производителем ООО «Металлург» СРО РАЛ. Статистическая обработка результатов исследования показала высокую эффективность РДА по сравнению с модификатором L-Cast® 5,3. Намечилась тенденция к снижению содержания MnO и FeO в шлаках, выплавленных с применением диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА. Среднее содержание MnO при раскислении РДА снизилось на 5%: до 3,54 против 3,72% при применении L-Cast® 5,3. Средняя концентрация FeO понизилась более резко, на 18%: до 0,66 против 0,78% при раскислении металла L-Cast® 5,3, что очень важно, так как концентрации FeO в шлаке имеет решающее значение. Это связано с тем, что оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые при термообработке трудно растворяются и уходят с границ зерен. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства стали. Таким образом РДА обладает более высокой эффективностью как раскислитель шлака по сравнению с L-Cast® 5,3. О более высокой раскисленности шлака, которая привела к снижению содержания кислото-рода в металле, свидетельствует увеличение концентрации остаточного алюминия в металле 0,04752 против 0,0044%. В результате заливщики отметили более высокую жидкотекучесть расплава и лучшую заполняемость форм. **Практическая значимость.** Результаты исследований дали возможность внедрить технологический процесс диффузионного раскисления стали 110Г13Л диффузионным раскислителем РДА в сталелитейном цехе ПАО «Михайловский ГОК» с экономическим эффектом свыше 3 млн руб.

Ключевые слова: сталь, шлак, статистическая обработка, модифицирование, диффузионное раскисление.

© Чайкин А.В., Чайкин В.А., Лозов В.С., Касимгазинов А.Д., Карман Ю.В., Быков П.О., 2018

Введение

В сталелитейном цехе ПАО «Михайловский ГОК» изготавливают отливки конусов дробилок, футеровочных плит мельниц, зубьев ковшей экскаваторов и другие отливки из стали 110Г13Л. Анализ качественных показателей сталей, выплавленных с применением различных технологий восстановительного периода, проводился в условиях вышеуказанного цеха. В ПАО выплавляют стали 110Г13Л для отливок, химические составы которых приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1
Химический состав стали 110Г13Л
1-й группы отливок

Массовая доля элементов, %			Массовая доля элементов, %, не более			
Углерод	Марганец	Кремний	Сера	Фосфор	Хром	Никель
0,9–1,1	11,5–13	0,3–0,7	0,05	0,07	0,7	1,0

Таблица 2
Химический состав стали 110Г13Л
для 2-й группы отливок

Массовая доля элементов, %			Массовая доля элементов, %, не более			
Углерод	Марганец	Кремний	Сера	Фосфор	Хром	Никель
0,9–1,4	11,5–15	0,3–1,0	0,05	0,12	1,0	1,0

До внедрения новых раскислительных смесей окончательное рафинирование металла производили модификатором L-Cast® 5,3, который отдавали на шлак за 10–15 мин до выпуска плавки в количестве 4 кг на 1 т жидкой стали. L-Cast® 5,3 подавали после достижения удовлетворительной раскисленности металла. Массовая доля закиси железа в шлаке перед отдачей модификатора должна быть не более 1,5%, а закиси марганца – не более 9,0%.

Механизм действия L-Cast® 5,3 заключается в следующем [1]. Введение в расплав барий-стронций-кальциевых карбонатов, содержащихся в L-Cast, сопровождается интенсивным перемешиванием металла и шлака вследствие выделения пузырьков CO₂. Это усиливает эффект рафинирования сталей от газов и неметаллических включений, особенно сульфидов. L-Cast® 5,3 по информации производителей обладает и модифицирующим действием, за счет чего должны достигаться улучшения структуры и свойств стали.

Постановка задачи

Работа посвящена совершенствованию технологического процесса восстановительного периода плавки стали 110Г13Л. С целью повышения эффективности рафинирования металла и

снижения себестоимости стали взамен модификатора L-Cast® 5,3 применили диффузионный раскислитель алюмосодержащий (РДА) в таком же количестве: 4 кг на 1 тн жидкой стали. РДА разработан и производится ООО «Металлург» СРО РАЛ по ТУ 0826 – 003 – 47647304 – 2001.

Описание процесса

Известно, что диффузионное раскисление обеспечивает получение чистого металла за счет снижения содержания кислорода в стали без образования в расплаве неметаллической фазы [2]. Кроме того, этот метод препятствует поступлению кислорода из атмосферы печи в металл. Эффективность диффузионного раскисления тем выше, чем меньше концентрация и активность оксида железа в шлаке [3]. Эту задачу эффективно решает РДА, представляющий собой пакетированные смеси, состоящие в основном из порошков активированного высокотемпературной обработкой углерода и полученного физико-химическим путем металлического кремния. Кроме того, в составе РДА находятся алюминий и соединения натрия и калия. Очень важно, что количественный и фракционный состав компонентов в РДА оптимизирован [4], что способствует вспениванию шлака, повышению его температуры [5], разжижению и увеличению реакционной способности шлака [6]. Основная особенность разработанной смеси заключается в том, что компоненты в ней находятся в высокодисперсном состоянии. Резкое увеличение удельной поверхности частиц смеси предполагает существенную интенсификацию процесса восстановления окислов. Это позволяет резко снизить время восстановительного периода при одновременном повышении эффективности процесса. Применен еще один путь интенсификации раскисления – быстрое покрытие поверхности шлака раскислительной смесью. Эту задачу решают соединения натрия и калия, которые делают смесь жидкоподвижной и способствуют ее быстрому растеканию по поверхности шлака [7, 8].

В результате обработки шлака РДА и выдержки в течение 15 минут в шлаке, а соответственно и в металле, резко снижается содержание оксидов железа, марганца и хрома.

Методика исследований

Материалом для исследований служили стали 110Г13Л, выплавленные в электродуговых печах ДСП 6 с применением модификатора L-Cast® 5,3 и раскислительной смеси РДА. В работе широко применялась статистическая обработка результатов исследова-

Таблица 3

Результаты статистической обработки сталей до внедрения

Описательные статистики (Статистика l-cast.sta)							
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вар. V, %
C, %	251	1,15000	0,92000	1,55000	0,0131	0,11436	9,94472
Si, %	251	0,56801	0,34000	0,84000	0,0070	0,08387	14,76589
Mn, %	251	12,63124	11,20000	13,75000	0,1831	0,42789	3,38759
Cr, %	251	0,30936	0,06000	0,96000	0,0298	0,17265	55,80715
Ni, %	251	0,11143	0,05000	0,36000	0,0018	0,04281	38,41848
P, %	251	0,04284	0,02600	0,06800	0,0001	0,01073	25,05955
S, %	251	0,00561	0,00100	0,01500	0,0000	0,00356	63,34907
Ti, %	251	0,02714	0,00300	0,23000	0,0002	0,01551	57,14554
Cu, %	251	0,12105	0,03700	0,29000	0,0008	0,02903	23,98461
Al, %	251	0,04437	0,01400	0,08400	0,0002	0,01264	28,47959
SiO ₂ , %	251	35,20414	22,00000	48,60000	20,2567	4,50075	12,78471
CaO, %	251	32,54199	0,67000	58,50000	158,2432	12,57947	38,65613
MnO, %	251	3,72805	1,20000	9,06000	1,7040	1,30536	35,01459
FeO, %	251	0,78195	0,16000	2,60000	0,1541	0,39259	50,20640
основность	251	0,97810	0,01727	2,57965	0,2543	0,50432	51,56084

Таблица 4

Результаты статистической обработки сталей после внедрения

Описательные статистики (Статистика РДА)							
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вар. V, %
C, %	109	1,15578	0,96000	1,40000	0,0144	0,11986	10,37010
Si, %	109	0,59835	0,42000	0,93000	0,0070	0,08347	13,95044
Mn, %	109	12,69367	11,66000	14,40000	0,1726	0,41544	3,27281
Cr, %	109	0,35434	0,09000	1,70000	0,0492	0,22191	62,62580
Ni, %	109	0,11202	0,07000	0,30000	0,0011	0,03319	29,62730
P, %	109	0,04037	0,02600	0,06000	0,0001	0,00944	23,38187
S, %	109	0,00641	0,00200	0,02300	0,0000	0,00449	70,03392
Ti, %	109	0,02609	0,01200	0,04500	0,0000	0,00707	27,09347
Cu, %	109	0,11862	0,07000	0,17000	0,0003	0,01766	14,88983
Al, %	109	0,04752	0,01300	0,09300	0,0002	0,01518	31,94664
SiO ₂ , %	106	34,76604	22,00000	45,20000	21,4278	4,62902	13,31476
CaO, %	106	33,30943	3,70000	59,00000	199,5085	14,12475	42,40464
MnO, %	106	3,54887	1,45000	7,10000	1,3822	1,17565	33,12758
FeO, %	106	0,66085	0,16000	1,50000	0,0899	0,29987	45,37650
основность	106	1,02489	0,10482	2,67273	0,3341	0,57799	56,39576

Исследователи рекомендуют выдерживать концентрации марганца в расплаве 12–12,5% для обеспечения требуемого комплекса физико-механических свойств стали [12, 13]. Сталевары выдерживают концентрации этого элемента близко к этим требованиям, равными 12,63 и 12,69%, о чем свидетельствуют данные табл. 3, 4. Следует отметить, что концентрации марганца, основного определяющего элемента стали, особенно однородны ($V = 3,27–3,38$). Наглядно это хорошо видно на гистограмме для 251 плавки, представленной на рис. 1.

ний, которую производили с использованием компьютерной программы STATISTICS & ANALISIS. Уровень значимости для расчетов принимали равным 0,05 [9]. Определяли средние арифметические значения химического состава металла и шлаков, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность. Чем меньше вариации колеблются вокруг средней, тем она более надежна. О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака [10]. Последний рассчитывается как отношение среднего квадратичного отклонения к средней арифметической. Образцы для определения физико-механических свойств сталей получали непосредственно из отливок. На прессе ломали отливки, металл которых раскислялся L-Cast® 5,3 и РДА. Затем из отливок вырезали заготовки для изготовления образцов на ударную вязкость, износостойкость, изучения микроструктуры в литом и термообработанном состоянии. Термообработка проводилась по серийному режиму: нагрев до 1050–1070°C, выдержка 2–2,5 ч и охлаждение в проточной воде с температурой 20°C.

Результаты исследований

Произвели статистическую обработку химического состава сталей 110Г13Л для отливок 1 и 2 групп, а также шлаков. Исследовали 251 плавку сталей, проведенных с использованием L-Cast® 5,3 и 109 плавку сталей с использованием диффузионного раскислителя алюмосодержащего РДА. Результаты статистической обработки сталей до и после внедрения представлены в табл. 3 и 4.

Как видно из данных табл. 3 и 4, среднее содержание углерода в сталях достаточно стабильно ($V_C = 9,94–10,37$), и концентрации его, равные 1,15 и 1,155, находятся в пределах, рекомендуемых исследователями (1,5–1,25) [11]. Превышение концентраций против указанных влечет за собой появление в микроструктуре избыточного количества карбидной фазы и ее укрупнения, что негативно сказывается на механических и эксплуатационных свойствах. Средние концентрации кремния в сталях составляют 0,56–0,59%.

Что касается содержания кремния, то можно рекомендовать выплавлять сталь с содержанием этого элемента ближе к нижнему пределу, так как этот элемент существенно снижает предельную растворимость углерода в марганцевом аустените, создавая тем самым условия для выпадения значительного количества карбидной фазы при первичной кристаллизации металла. $V_{Si} = 13,95–14,76\%$ [11].



Рис. 1. Гистограмма концентраций марганца

Как видно, распределение марганца стремится к нормальному, что свидетельствует о высокой однородности содержаний марганца в сталях. Таким образом, вышесказанное свидетельствует о высокой профессиональной подготовке сталеваров и удовлетворительной технологической дисциплине на участке плавки.

Концентрации элементов, не рассмотренных выше, менее стабильны, однако это определяется качеством шихтовых материалов. В целом шихта обеспечивает возможность выполнения требований нормативно-технической документации (НТД).

Восстановительный период плавки оказывает решающее значение на качество металла [14]. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки [15]. Они должны быть высокоосновными и рассыпающимися в белый порошок с содержанием $MnO \leq 5\%$ и $FeO \leq 1\%$. Чем меньше оксидов марганца и железа в шлаке, тем меньше их будет и в металле [14].

Как видно из сравнения данных табл. 3 и 4, наметилась тенденция к снижению содержания MnO и FeO в шлаках, выплавленных с применением диффузионного раскислителя алюмо-содержащего РДА. Среднее содержание MnO при раскислении РДА снизилось на 5%: до 3,54 против 3,72% при применении L-Cast® 5,3. Средняя концентрация FeO понизилась более резко на 18%: до 0,66% против 0,78% при раскислении металла L-Cast® 5,3, – что очень важно, так как концентрация FeO в шлаке имеет решающее значение. Это связано с тем, что оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые при термообработке трудно растворяются и уходят с

границ зерен. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства стали. Таким образом, РДА обладает более высокой эффективностью как раскислитель шлака по сравнению с L-Cast® 5,3. О более высокой раскисленности шлака, которая привела к снижению содержания кислорода в металле, свидетельствует увеличение концентрации остаточного алюминия в металле: 0,04752 против 0,0044%. Кроме того, заливщики отметили более высокую жидкотекучесть расплава и лучшую заполняемость форм.

В дальнейшем проверяли эффективность раскисления стали на конкретной отливке 08.35505.29.00005У «Зуб ковша», изготавливаемой из стали 110Г13Л. Это массивная отливка, что позволило провести широкий спектр испытаний.

Результаты испытаний механических свойств, микроструктур, а также испытания на износостойкость приведены в табл. 5 и на рис. 2.

Таблица 5

Результаты испытаний отливок «Зуб ковша»

Состояние отливки	Балл зерна аустенита ГОСТ 5639		Распределение карбидов ОСТ 23.1.165		KCU, ТО МДж/м ²	Износ, % ТО	
	Без ТО	ТО	Без ТО	ТО		110Г13Л	38ХС
Обработанная L-Cast® 5,3	2	2	7–9	1–2	2,01	0,61	1,02
Раскисленная РДА	3	3–4	6–8	1–2	2,80	0,40	0,84

После обработки стали РДА микроструктура отливки стала более благоприятной. Распределение карбидов не изменилось. Однако в микроструктуре измельчилось зерно (рис. 2, б), устранена разнотерность, присущая отливке, обработанной L-Cast® 5,3 (рис. 2, а). Как следствие, выросла ударная вязкость стали на 39,3% (см. табл. 3). Кроме того, как видно из данных табл. 3, триботехнические испытания образцов показали повышение износостойкости стали, обработанной РДА, по сравнению с металлом, обработанным L-Cast® 5,3, на 34,4% и 17,6% на стали 38ХС. На образцах из стали 110Г13Л поверхность износа была ровная и гладкая, с серосиними цветами побежалости. Поверхность износа контртела имела неровный рельеф, синефиолетовые цвета побежалости. Таким образом, прослеживается устойчивая тенденция увеличения износостойкости образцов из стали, обработанных РДА. Несмотря на то, что эти данные получены для условий абразивного износа, можно прогнозировать увеличение износостойкости стали и в условиях ударно-абразивного износа.

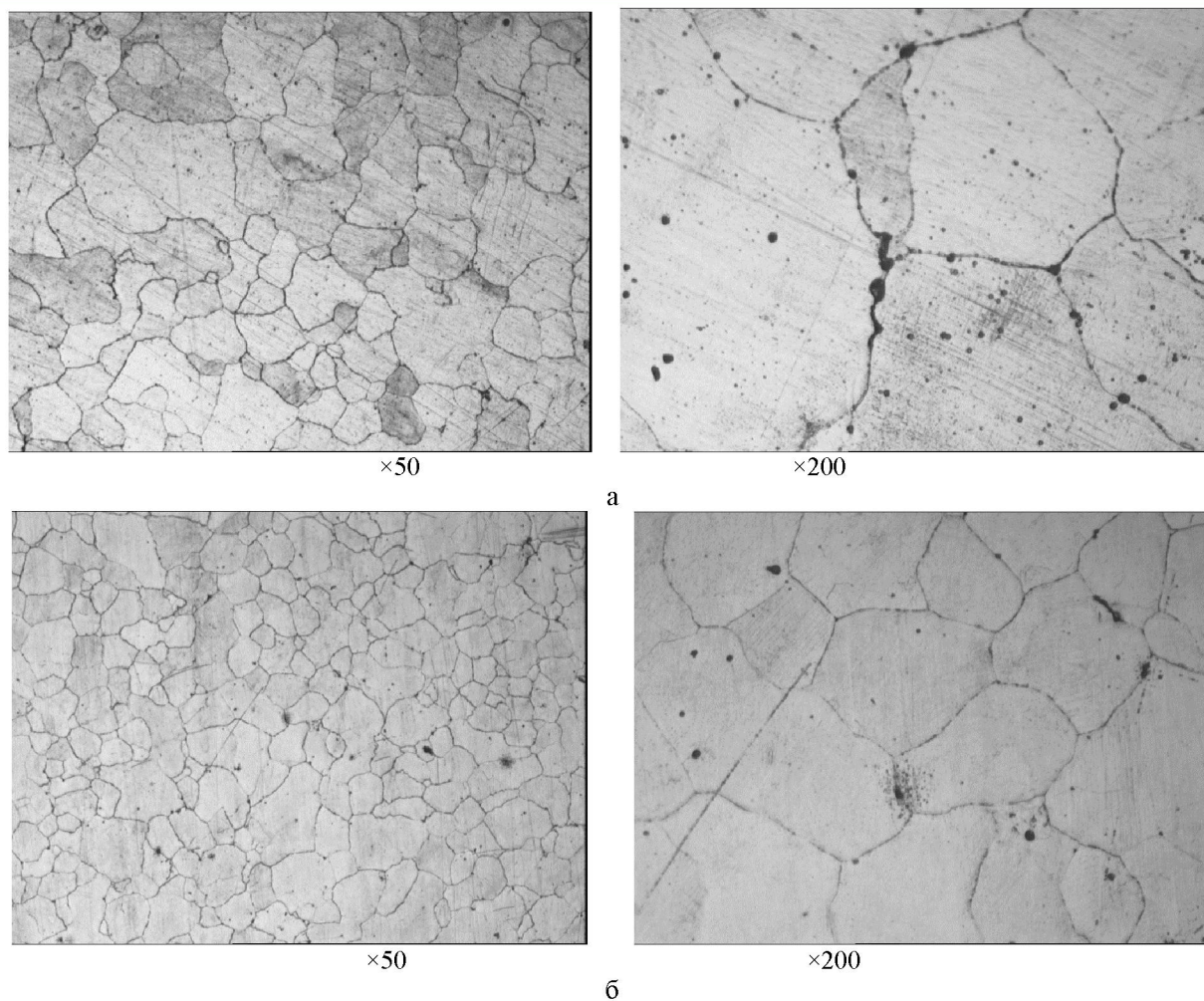


Рис. 2. Микроструктура отливок зуб ковша после термической обработки:
а – отливка из стали, обработанной L-Cast® 5,3; б – отливка из стали, раскисленной РДА

Выводы

1. Разработанный диффузионный раскислитель алюмосодержащий РДА, отличающийся высокой дисперсностью частиц, эффективнее раскисляет металл по сравнению с модификатором L-Cast® 5,3.

2. Микроструктура отливок стала более благоприятной, повысились механические свойства и износостойкость стали.

3. Достигнута более высокая жидкотекучесть расплава и лучшая заполняемость форм.

4. Это дало возможность внедрить технологический процесс диффузионного раскисления стали 110Г13Л диффузионным раскислителем РДА с экономическим эффектом свыше 3 млн руб.

Список литературы

1. Пат. 2364649 РФ. Способ внепечной обработки стали / Рашников В.Ф., Та-хаутдинов Р.С., Колокольцев В.М. и др. Оpubл. 2003.10.27.

2. Производство стальных отливок: учебник для вузов / Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Вдовин К.Н. и др.; под ред. Л.Я. Козлова. М.: МИСиС, 2003. 351 с.
3. J. Guo, S. Cheng, Zi-jian. 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, February. Vol. 21, iss. 2. P. 166–173
4. Совершенствование технологии выплавки сталей в ООО «Самарский завод технического литья» с применением дисперсных материалов / Чайкин В.А., Чайкин А.В., Колколова А.В. и др. // Труды XI съезда литейщиков России, Екатеринбург, 16–20 сентября 2013. Екатеринбург, 2013. С. 78–83.
5. Кожухов А.А. Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП // Электromеталлургия. 2015. №6. С. 3–9.
6. Чайкин В.А., Чайкин А.В. Применение диффузионных раскислительных и рафинирующих смесей при выплавке сталей и чугунов в электродуговых печах // Литейное производство сегодня и завтра: тр. международной научно-практической конференции / под

- ред. Косникова Г.А. СПб.: Культ-информ.-пресс, 2014. С. 161–164.
7. Флюсы для электрошлакового переплава конструкционных сталей / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г. и др. // Электрометаллургия. 2017. №4. С. 13–19.
 8. Neput T., Ardelean E., Socalici A., Osaci M., Ardelean M. Steel deoxidation with synthetic slag. *Metalurgia International*. 2010. Vol. 15. Iss. 7. P. 22–28.
 9. Сидняев, Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для бакалавров. М.: Юрайт, 2015. 219 с. Серия: Бакалавр.
 10. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2014. 495 с.
 11. Давыдов Н.Г. Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия, 1979. 175 с.
 12. Власов В.И., Комолова Е.Ф. Литая высомарганцовистая сталь. М.: Машгиз, 1987. 195 с.
 13. G.C. Attila. Refining steel in an induction ladle furnace. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2015, Aug. Vol. 13. Iss. 3. P. 197–200.
 14. V. Putan, A. Putan, E. Ardelean. 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.
 15. Чайкин В.А., Чайкин А.В. Рафинирование сталей и чугунов дисперсными модификаторами при выплавке в дуговых и индукционных электропечах // Тр. двенадцатого съезда литейщиков России. Н. Новгород, 2015. С. 155–159.

Поступила 19.12.17.

Принята в печать 18.01.18.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY INDICES OF THE 110G13L STEEL PRODUCED WITH VARIOUS INOCULANTS AND DEOXIDIZING AGENTS

Andrey V. Chaykin – Ph.D. (Eng.)

Technical Director at the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association, Safonovo, Russia. E-mail: chaika1983@inbox.ru

Vladimir A. Chaykin – D.Sc. (Eng.), Professor

General Director at the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association, Safonovo, Russia. E-mail: sro_ral@mail.ru

Vitaly S. Lozov – Chief Metallurgist

Mikhailovsky GOK PJSC, Zheleznogorsk, Russia. E-mail: V_Lozov@mgok.ru

Aset D. Kasimgazinov – Chief Process Engineer

Casting LLC, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: kasimgazinov@pf.casting.kz

Yury V. Karman – Director

Casting LLC, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: office@pf.casting.kz

Petr O. Bykov – Ph.D. (Eng.), Vice Pector for Academic Affairs

Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: bykov_petr@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance). This paper describes special characteristics and potential benefits of the aluminum-containing diffusion deoxidizer RDA, which was developed to deliver a broad range of additional performance properties in castings and help shorten the reduction time in the case of the 110G13L steel. The relevance of this research is demonstrated in the case study of Mikhailovsky GOK, for which the adoption of the diffusion deoxidizer resulted in the economic benefit of 3 million rubles. **Objectives.** The aim of this research was to find ways to optimize the reduction process of the 110G13L steel. **Methods Applied.** The research heavily relied on statistical analysis method. Thus, all the results were analysed with the help of the STATISTICS & ANALYSIS computer programme. The tests were run with an alpha level of 0.5. There were determined arithmetic averages for the chemical composition of metal and slags, as well as their variation indices that characterize their stability. The less the variations fluctuate around an average, the more stable the average is. The range of variations defined the stability of the

property. The variation coefficient best describes the homogeneity of characteristics because it indicates the relative measure of fluctuations. It can be defined as a ratio of the standard deviation to the arithmetic average. **Originality.** A special feature of the new deoxidizer is that all of its components are present in a finely dispersed state. A drastic increase in the specific surface of the particles contained in the deoxidizer would lead to a significantly more intense reduction process, which enables a dramatically shorter and more efficient reduction process. Another method was applied to intensify deoxidation, and namely – rapid application of the deoxidizer over the slag surface. This effect is achieved due to the sodium and potassium compounds, which make the mixture flowable and help it spread rapidly across the slag surface. **Findings:** The article contains a comparison between the L-Cast® 5.3 inoculant and the aluminum-containing high-dispersion diffusion deoxidizer RDA (the latter was developed by Metallurg LLC, the Smolensk Regional Office of the Russian Foundry Association) and their refining efficiencies. The statistical analysis of experimental data showed a higher efficiency of RDA compared with L-

Cast® 5.3. Lower concentrations of MnO and FeO were observed in the slags produced with the aluminum-containing high-dispersion diffusion deoxidizer RDA. The average MnO content decreased by 5% - to 3.54 when the RDA deoxidizer was applied versus a 3.72% concentration resulting from the application of L-Cast® 5.3. There was a more drastic decrease in the average concentration of FeO - by 18% to 0.66% versus a 0.78% concentration resulting from the use of L-Cast® 5.3 as a deoxidizer, which is extremely important as the FeO concentration is critical for slags. It refers to the fact that MnO dissolves FeO creating very strong conglomerates, which, when heat is applied, are hard to dissolve and tend to stay at the grain boundaries. The less FeO concentration there is in the slag the thinner the grain boundaries are and the better the performance of steel is. Consequently, RDA is a more efficient deoxidizer for slag than L-Cast® 5.3. The increase of the residual aluminium in steel from 0.0044% to 0.04752% indicates a higher deoxidation degree of the slag, which led to a decrease in the oxygen content. As a result, pourers pointed out a better fluidity and moldability of molten steel. **Practical Relevance.** Due to the results of this research, the Mikhailovsky GOK foundry was able to adopt the RDA diffusion deoxidizer for application with the 110G13L steel seeing the economic benefit of 3 million rubles.

Keywords: Steel, slag, statistical analysis, inoculation, diffusion deoxidation.

References

1. Rashnikov V.F., Takhautdinov R.S., Kolokoltsev V.M. et al. *Sposob vnepechnoy obrabotki stali* [Method of steel ladle treatment]. Patent RF, no. 2002104454/02, 2003.
2. Kozlov L.Ya., Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N. et al. *Proizvodstvo stalnykh otlivok* [Steel castings]. Textbook for university students. Ed. by L.Ya. Kozlov. Moscow: MISIS, 2003, 351 p. (In Russ.)
3. J. Guo, S. Cheng, Zi-jian. 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, February, vol. 21, iss. 2, pp. 166-173
4. Chaykin V.A., Chaykin A.V., Kolokolova A.V. et al. Steel melting technology improvement in OOO «Samrskiy zavod tehnikeskogo litya» with the help of disperse materials. *Trudi iodiinadtsogo zvezda liteyshikov Rossii*, [Proceedings of the 11th Russian Foundry conference]. Ecaterenbourg, 2013, pp.78-83. (In Russ.)
5. Koghukhov A.A. Estimation of the heat coefficient of the electric arcs during the melting pprocess under foam slag in an electric arc furnace. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2015, no. 6, pp. 3-9. (In Russ.)
6. Chaykin V.A., Chaykin A.V. Diffusive, deoxidizing and refining mixtures exploitation during steel and iron melting processes in electric arc furnace. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra: tr. Megdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Casting Technologies today and tomorrow: proceedings of the interentional scientific and technical conference]. Ed. by Kosnikov G.A. S.Peterburg: Kult-Inform.-press, 2014, pp. 161-164. (In Russ.)
7. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Pivovarova K.G et al. Fluxes for electroslag remelting of construction steels. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2017, no. 4, pp. 13-19. (In Russ.)
8. 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.
9. Sidnayeve N.I. *Probability Theory and mathematical statistics: textbook for bachelors'* [Teoriya veeroyatnosti and matematicheskaya statistika: uchebnik dlya bakalavrov]. Moscow: Yurajit, 2015. 219 p. Serious: Bachelor. (In Russ.)
10. Sidnayeve N.I. *Theory of planning an experiment and analysis of statistical data* [Teoriya planirovaniya experimenta i analis statisticheskikh dannikh]. Moscow: Yurajit, 2014. 495 p. (In Russ.)
11. Davidov N.G. *Visokomargantstevaya steel* [High-manganese steel]. Moscow, Metallurgiya, 1979, 175 p. (In Russ.)
12. Vlasov V.I., Komolova E.F. *Litaya visokomargantstevaya stal* [Molten high-manganese steel]. Moscow: Mashgiz, 1987, 195 p. (In Russ.)
13. G.C. Attila. Refining steel in an induction ladle furnace. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2015, Aug, vol. 13, iss. 3, pp. 197-200.
14. V. Putan, A. Putan, E. Ardelean. 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.
15. Chaykin V.A., Chaykin A.V. The use of dispersive inoculants to refine steel and cast produced in arc induction electric furnaces. *Trudy dvenadzatogo syezda liteyshyikov Rossii* [Proceedings of the 12th Russian Foundry Conference]. N.Novgorod, 2015, pp. 155-159 (In Russ.)

Received 19/12/17

Accepted 18/01/18

Образец для цитирования

Сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленной с применением различных модификаторов и раскислительных смесей / Чайкин А.В., Чайкин В.А., Лозов В.С., Касимгазинов А.Д., Карман Ю.В., Быков П.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 19–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>

For citation

Chaykin A.V., Chaykin V.A., Lozov V.S., Kasimgazinov A.D., Karman Yu.V., Bykov P.O. Comparative analysis of the quality indices of the 110G13L steel produced with various inoculants and deoxidizing agents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 19–25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-19-25>