



УДК 621.74.94

В.В. Колпаков (Рубцовский филиал АО "Алтайвагон"),
А.В. Чайкин (Смоленское региональное отделение
Российской ассоциации литейщиков (СРО РАЛ), г. Сафоново),
В.А. Чайкин, К.Н. Вдовин (Магнитогорский государственный
технический университет имени Г.И. Носова)

Совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л методом переплава

Работа посвящена совершенствованию технологического процесса плавки стали 110Г13Л методом переплава для повышения эффективности рафинирования металла и свойств, снижения себестоимости стали, расширения номенклатуры отливок, выплавляемых методом переплава. Для решения задач снижения угара марганца, увеличения эффективности диффузионного раскисления стали, экономии электроэнергии и дорогостоящих материалов применены три направления совершенствования выплавки стали методом переплава: раннее наведение шлака, повышение эффективности диффузионного раскисления, внепечная обработка расплава. На всех стадиях использованы новые дисперсные материалы, разработанные ООО "Металлурге" СРО РАЛ.

Ключевые слова: высокомарганцевая сталь; электродуговая печь; технология выплавки; диффузионное раскисление; шлаковый режим.

The study is devoted to the embetterment of Hadfield steel making technological process using remelting method. The purpose of the work is to increase the metal refining effectiveness and its properties, to decrease the net price of steel, to expand nomenclature of the castings produced by the remelting method. Moreover, such tasks as manganese fugacity reduction, increase of diffusive steel deoxidation efficiency, energy and high-cost materials savings are implemented during the work. Three directions for the efficiency improvement are used: early slag melting, the efficiency of diffusive deoxidation increase, and off-furnace metal treatment. Newly designed fine materials by LLC "Metallurg" Smolensk regional office Russian Association of Foundrymen are used during all the work stages.

Keywords: high-manganese steel; electric arc furnace; smelting technology; diffusion deoxidation; slag mode.

Введение. Снижение себестоимости продукции, повышение механических и эксплуатационных свойств отливок из углеродистой и легированных сталей — актуальные задачи предприятий в связи с возрастающей конкуренцией за рынки сбыта продукции [1]. Эти задачи решали в АО "Оскольский завод металлургического машиностроения" (АО "ОЗММ") при выплавке стали 110Г13Л совместно со специалистами завода.

Высокомарганцевая сталь обладает уникальным комплексом свойств, позволяющим изготавливать из нее конструктивно сложные отливки, эксплуатирующиеся в условиях больших динамических и циклических нагрузок, интенсивного износа [2]. В АО "ОЗММ" выплавляют сталь 110Г13Л для отливок 1-й и 2-й групп (табл. 1) методом окисления и переплава. Последний метод наиболее экономичный, так как после расплавления шихты шлак, как

1. Химический состав, % мас., стали 110Г13Л 1-й и 2-й групп отливок

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
			Не более			
1-я группа отливок						
0,9...1,1	11,5...13	0,3...0,7	0,5	0,07	0,07	1,0
2-я группа отливок						
0,9...1,4	11,5...15	0,3...1,0	0,05	0,12	1,0	1,0

правило, не скачивают, а сразу приступают к проведению восстановительного периода. В результате при выплавке стали методом переплава по сравнению с окислительной плавкой за счет отсутствия окислительного периода сокращается расход легирующих добавок, электроэнергии на 12...15 %, повышается производительность печи на 15...20 % [3].

При плавке методом переплава отходов в шихте используют чистый плотный амортизационный лом этой марки стали (зубья экскаваторов, стрелочные переводы, траки и др.), но чаще всего применяют собственный возврат: прибыли, литники, сливы, скрап и т.п. Восстановительный период проводят под шлаком периода плавления. Для восстановления оксидов марганца и железа на шлак присаживали известь, плавиковый шпат и молотый ферросилиций ФС65 в количестве 6,5 кг/т годного. Помол ферросилиция осуществляли в чашевой бегунковой мельнице, в которой реализован принцип измельчения ферросилиция с помощью раздавливания и истирания между катками (бегунками) и поверхностью чаши. Процесс помола отличают высокая трудоемкость, обильное пылевыведение и взрывоопасность.

Требуемое суммарное содержание MnO и FeO (<5 %) [4] в предвыпускном шлаке получали увеличением продолжительности восстановительного периода плавки и повышением интенсивности обработки шлака раскислительной смесью. Но это зачастую не обеспечивало требуемого восстановления марганца и железа из шлака. В результате снизились уровень механических свойств, обусловленный требованиями технических условий на отливки из стали 110Г13Л, и жидкотекучесть стали, что увеличивало количество брака вследствие образования дефектов горячая трещина и спай при одновременном увеличении затрат на производство. Поэтому метод переплава использовали для получения отливок

1-й группы. Для изготовления ответственного литья применяли плавку с окислением примесей. Для повышения механических свойств стали 110Г13Л рекомендуют проводить легирование [5], модифицирование расплава [6, 7], однако это существенно повышает себестоимость стали.

Цель работы — совершенствование технологического процесса плавки стали 110Г13Л методом переплава для повышения эффективности рафинирования металла и свойств, снижения себестоимости стали, расширения номенклатуры отливок, выплавляемых методом переплава.

Для решения задач снижения угара марганца, повышения эффективности диффузионного раскисления стали, экономии электроэнергии и дорогостоящих материалов применены три направления совершенствования выплавки стали методом переплава.

Методика проведения исследований. Материалом для исследований служила сталь 110Г13Л, выплавленная в электродуговой печи ДСП 6 с основной футеровкой методом переплава. Для раннего наведения шлака во время плавления шихты на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс *разжижитель шлака* (РШ) в количестве 5 кг/т жидкого, что обеспечивало снижение угара марганца, уменьшение времени плавления материалов и экономию электроэнергии.

Основу РШ составляет глиноземсодержащий материал, который снижает температуру плавления основных шлаков. Для повышения основности шлака в РШ добавляли кальций-стронциевый карбонат. Для более существенного снижения температуры плавления в состав РШ введены оксиды калия и натрия, а также плавикошпатовый концентрат. Отличительной особенностью РШ является высокая дисперсность, что также снижает температуру плавления шлака. Флюс РШ расширяет

временной и температурный интервал разжигающей способности плавикового шпата.

В восстановительный период плавки проводили диффузионное раскисление расплава и доводили металл по химическому составу. Диффузионное раскисление в печи осуществляли до получения белого или светло-серого шлака *раскислителем диффузионным алюмосодержащим* (РДА) после увеличения основности шлака ($B = 2$) добавками извести. Затем выполняли слив стали в разогретый до температуры 500 °С ковш вместе со шлаком. Причем большую часть шлака сливали в начальный период.

В ковше проводили окончательное раскисление стали алюминием. Расход алюминия был снижен на 50 % от обычного и составил 0,5 кг/т жидкого. Дополнительно осуществляли внепечную обработку расплава *рафинирующей смесью алюмосодержащей* (РСА) в количестве 5 кг/т жидкого. Особенностью смеси РСА является то, что она изготовлена на основе системы оксидов $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaF}_2$ и карбонатов CaCO_3 и SrCO_3 . Смесь характеризуют отсутствием гидратации и сепарации, а также большей скоростью формирования шлаковой фазы. РСА представляет собой усовершенствованный синтетический шлак с высокой основностью и низкой окисленностью, с низкими температурой плавления, вязкостью и поверхностным натяжением. Это позволяет образующимся в процессе выпуска металла каплям РСА аккумулировать оксиды марганца, железа, алюминия и сульфиды, очищая металл, а также дегазируя его, повышая таким образом его механические свойства.

Химический состав стали 110Г13Л определяли на оптико-эмиссионном спектрометре FOUNDRY-MASTER. В качестве образцов использовали пробы, залитые ложкой в металлический кокиль. Шлаки отбирали ложкой в печи и выливали на металлическую плиту. Качество шлаков анализировали визуально и химическими методами. Заготовки образцов для определения физико-механических свойств сталей получали заливкой в сухие стержневые формы пробных брусков по ГОСТ 977—88. Микроструктуру в литом и термообработанном состояниях изучали на микрошлифах, изготовленных из остатков образцов, на микроскопе типа МЕТАМ — ВВ.

Применяли статистическую обработку результатов исследований с использовани-

ем компьютерной программы STATISTICS & ANALYSIS. Уровень значимости для расчетов приняли равным 0,05 [8]. Определяли средние арифметические значения химического состава металла, 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 рассчитывали как отношение среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому значению химического состава.

Описание процесса. Первое направление совершенствования технологического процесса заключалось в организации раннего наведения шлака во время плавления шихты, что обеспечивало снижение угара марганца, уменьшение времени плавления материалов и экономию электроэнергии. Для этого на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс РШ в количестве 5 кг/т жидкого.

В процессе расплавления шихты в прорезаемых колодцах под электродами из легкоплавкого флюса РШ и извести достаточно быстро формируется жидкоподвижный шлак. Наведенный шлак экранирует дуги в колодцах и хорошо защищает от угара первые порции жидкого металла [9]. Экранирование дуг в колодцах жидкоподвижным шлаком способствует также снижению теплотеря, быстрому нагреву шлака и металла и, соответственно, уменьшению времени плавления шихты и экономии электроэнергии.

Второе направление совершенствования технологии заключалось в более эффективном диффузионном раскислении стали. Взамен молотого ферросилиция ФС65, используемого на заводе, применяли РДА в количестве 3 кг на 1 т жидкой стали. 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 [10]. 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 [11].

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 увеличение реакционной способности или физико-химической активности компонентов, а следовательно, и на кинетические характеристики реакций раскисления.

Задачу раскисления и десульфурации стали решали при проведении восстановительного периода плавки. Отличительной особенностью диффузионного раскисления является участие шлаковой фазы в металлургических процессах восстановления оксидов. Первоочередная задача заключается в связывании серы и восстановлении оксидов железа и марганца в шлаке [2]. Диффузионное раскисление основано на принципах закона распределения Нернста [15], согласно которому соотношение концентраций вещества, растворенного в двух смежных несмешивающихся жидкостях, для данных температур и давлений является постоянной величиной:

$$L = [\text{FeO}]/(\text{FeO}) = \text{const}; \quad (1)$$

$$L = [\text{FeS}]/(\text{FeS}) = \text{const}, \quad (2)$$

где $[\text{FeO}]$, $[\text{FeS}]$ — концентрации оксидов и сульфидов железа в стали; (FeO) , (FeS) — концентрации оксидов и сульфидов железа в шлаке.

Если уменьшить концентрации оксидов в шлаке, то начнется диффузионный переход кислорода и серы из металла в шлак, т.е. рафинирование металла. В связи с этим проведены работы по испытанию и внедрению РДА для сталей взамен молотого ферросилиция ФС65.

При подаче РДА на шлак дисперсные компоненты смеси способствуют равномерному распределению материала по поверхности шлака за короткий промежуток времени. Карбонаты кальция и стронция, входящие в состав смеси, мгновенно диссоциируют на CaO , SrO и CO_2 . Оксиды Ca и Sr повышают основность и сульфидоёмкость шлака. CO_2 способствует перемешиванию РДА со шлаком. Входящие в со-

став РДА соединения натрия, калия и оксиды алюминия способствуют разжижению шлака и делают его реакционноспособным. Кроме того, дисперсный углеродсодержащий материал дополнительно вспенивает шлак за счет протекания реакции восстановления оксидов из шлака по реакциям:



Вспененный жидкоподвижный шлак экранирует дуги, способствует быстрому нагреванию шлака и металла [14]. В результате создаются идеальные условия для дальнейшего протекания реакций десульфурации и восстановления оксидов железа и марганца из шлака присутствующими в РДА алюминием и кремнием:



Таким образом, сокращается время восстановительного периода, экономится электроэнергия. Образующийся Al_2O_3 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 смесью РДА. Сульфиды также переходят в шлак согласно закону распределения. Сталь оказывается с более низкими содержаниями оксидов и серы. За счет уменьшения в стали неметаллических включений и оксидных плен возрастают механические свойства и жидкотекучесть расплава.

Восстановление FeO из шлака имеет немаловажное значение, так как оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые трудно растворяются и с трудом уходят с границ зерен при термической обработке. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства. Поэтому при анализе шлаков желательно определять и контролировать количество FeO .

Третье направление совершенствования технологического процесса — внепечная обработка расплава в ковше РСА, обеспечивающая дальнейшее очищение металла от оксидов марганца и железа, а также сульфидов и других неметал-

лических включений. Это приводит к повышению механических свойств стали, что очень важно для метода переплава. Таким образом, задача внепечной обработки — частично заменить окислительный период и устранить объективные недоработки восстановительного периода.

Выпуск стали из печи проводили совместно со шлаком. Интенсивное перемешивание металла со шлаком в ковше обеспечивало снижение MnO и FeO и дополнительное рафинирование — из металла в белый шлак переходили сера и неметаллические включения. Дополнительная обработка стали РСА в ковше интенсифицировала рафинирование металла. В процессе обработки стали РСА неметаллические включения укрупняются и всплывают на зеркало металла в ковше за счет разности плотностей включений и самого металла. В процессе диссоциации карбонатов образуются пузырьки CO, которые, поднимаясь вверх в объеме расплава, увлекают за собой неметаллические включения и газы [11]. При комплексной обработке расплава в ковше происходит одновременное модифицирование включений с последующей флотацией их пузырьками на зеркало металла [13].

Обсуждение результатов исследований. По первому направлению совершенствования технологии провели плавки по существующей технологии и с ранним наведением шлака. Анализировали плавки, в которых использовали шихту, состоящую из 100 % собственного неочищенного возврата. После расплавления такой шихты образуется большое количество шлака с низкой основностью, так как оксид кремния неочищенного от формовочной смеси возврата создает основную массу шлака.

В рядовых плавках на дно печи загружали 150 кг извести. В экспериментальных плавках на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс РШ в количестве 45 кг. Затем загружали шихту. Плавление шло в штатном режиме. Однако в плавках с РШ в колодцах, прорезаемых электродами, раньше появлялся шлак. Наведенный шлак экранировал дуги в колодцах, о чем

свидетельствовала стабилизация горения дуг, которое характеризовалось равномерным и тихим гудением. [11]. Экранирование дуг в колодцах жидкоподвижным шлаком способствовало быстрому нагреванию шлака и металла, снижению тепловых потерь и, соответственно, уменьшению времени плавления шихты и экономии электроэнергии. Сравнительные результаты наличия MnO и FeO в шлаках, марганца в металле, а также время плавления шихты приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, раннее наведение шлака позволяет снизить угар марганца и железа, а также время плавления шихты, что подтверждает теоретические выкладки. Расчеты показали, что при мощности трансформатора 5 МВт и цене электроэнергии 3,96 руб./кВт·ч во время периода плавления на каждой плавке экономится 3300 руб. Кроме того, угорает на 40...45 кг меньше чистого марганца.

После небольших простоев печи (до 25 мин) шлак покрывался корочкой, однако оставался жидкоподвижным, чему способствовало применение РШ. После длительных простоев печи (до 2,5 ч) в связи с неготовностью ковша, отсутствием форм шлак окончательно не загустел и быстро приводился в жидкоподвижное состояние (значительно быстрее, чем при работе без РШ с плавиковым шпатом), что позволяло без проблем сливать содержимое печи без остатка. Это тоже позволяло экономить электроэнергию. Таким образом, РШ эффективно создает условия для благоприятного шлакового режима.

Шлаки и в том и в другом случаях были черного цвета, в том числе и в изломе (рис. 1), что свидетельствовало о большом количестве в них MnO и FeO при обоих вариантах плавления. Такие шлаки требуют интенсивного диффузионного раскисления.

На качество металла оказывает решающее значение восстановительный период плавки. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки. Они должны быть высокоосновными и рассыпающимися в белый порошок с содержанием в сумме FeO и MnO ≤ 5 %. Чем меньше оксидов железа и марганца в шлаке, тем меньше их будет и в металле [2].

2. Сравнительные показатели периода плавления

Вариант плавления	Химический состав, % мас. (среднее значение)			Время плавления, мин
	Шлак		Металл	
	MnO	FeO	Mn	
По рядовой технологии	33	2,3	11,8	45
С ранним наведением шлака	27	1,92	12,3	35



Рис. 1. Шлак после расплавления

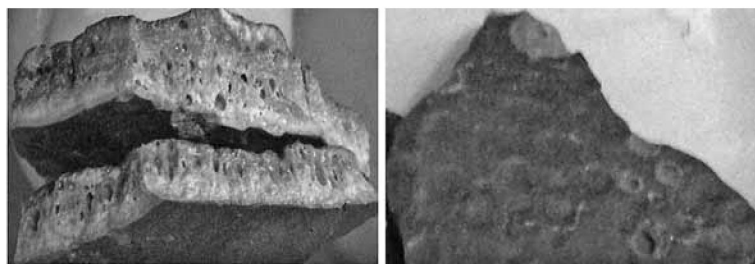


Рис. 2. Шлак после диффузионного раскисления РДА

Диффузионное раскисление проводили раскислительной смесью РДА. Перед раскислением на шлак присаживали до 300 кг извести для поднятия основности шлака. После расплавления извести начинали диффузионное раскисление. Рациональную присадку РДА определили экспериментально: 4 кг на 1 т жидкой стали, т.е. 12 пакетов по 3 кг на одну плавку. РДА присаживали порционно в три приема по четыре пакета. По окончании реакции от предыдущей подачи присаживали следующую порцию. После присадки РДА смесь мгновенно расходилась по поверхности шлака и происходило интенсивное раскисление и разжижение шлака, сопровождающееся его вспениванием, о чем свидетельствовала стабилизация горения дуг, которое характеризовали равномерное и тихое гудение. При использовании молотого ферросилиция ФС65 он ложился на шлак локально и практически не расходился. Для эффективного раскисления необходимо было вручную равномерно распределить его по периметру печи. После присадок РДА визуально шлак был жидкоподвижным, равномерно распределенным и реакционноспособным. После окончания обработки шлаков РДА проводили отбор проб шлака на анализ. Шлак значительно посветлел в изломе (рис. 2), что свидетельствовало о восстановлении оксидов марганца и железа.

После диффузионного раскисления содержание MnO в шлаках уменьшилось до 11...16 %, FeO — до 0,8...0,9 %. При раскислении смесью с ферросилицием содержание MnO составляло 15...19 %, а FeO — более 1 %.

Таким образом, РДА оказался технологичнее молотого ФС65 и существенно дешевле. Вместе с тем концентрации оксида марганца в шлаке все же оставались недопустимо высокими. Одной из причин этого являлась невозможность достижения требуемой основности шлака, о чем свидетельствует зеленоватый оттенок излома и нерассыпчатость шлака. Для дальнейшего повышения качества металла, его

дегазации и удаления неметаллических включений провели внепечную обработку расплава.

На дно ковша загружали 45 кг (3 мешка) РСА. При этом в ковш отдавали на 5 кг меньше алюминия за счет наличия его в РСА, что обеспечивало экономию алюминия. РСА образует легкоплавкий, жидкоподвижный, высокоосновный шлак, активизирует процесс рафинирования расплава от неметаллических включений и способствует восстановлению марганца из металла и шлака. Это подтверждается тем, что в анализируемых плавках отмечены угар кремния и углерода и, напротив, существенный пригар марганца (табл. 3, 4).

Как видно из данных табл. 3, 4, в рядовых плавках без ковшовой обработки содержание углерода, кремния и марганца в печи и в ковше практически не изменялось. После обработки расплава в ковше РСА отмечены угар углерода, кремния и существенный пригар марганца. В таблицах приведены результаты шести плавков, но такая тенденция характерна для всех плавков. Таким образом, РСА, образуя легкоплавкий, жидкоподвижный, высокоосновный шлак, активизирует процесс рафинирования металла от неметаллических включений и вовлекает кремний и углерод металла в процесс восстановления оксида марганца, т.е. отмечается тенденция к экономии марганца.

Об эффективности РСА можно косвенно судить по пробе шлака из ковша (рис. 3). Шлак стал существенно светлее. Это свидетельствует о том, что количество FeO в шлаке снизилось.

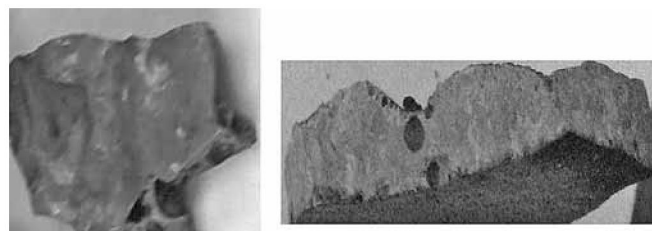


Рис. 3. Шлак после ковшовой обработки

3. Химический состав, % мас., металла в печи перед выпуском и в ковше без обработки РСА

Номер плавки	Место отбора проб	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Al
41416	Печь	1,13	0,51	13,6	0,064	0,88	0,21	0,03
	Ковш	1,13	0,53	13,7	0,066	0,87	0,20	0,032
41395	Печь	1,11	0,78	11,9	0,058	0,66	0,32	0,0075
	Ковш	1,08	0,77	11,8	0,053	0,67	0,32	0,0065
41403	Печь	1,06	0,55	13,3	0,050	0,75	0,20	0,0065
	Ковш	1,08	0,57	13,3	0,56	0,75	0,21	0,04

4. Химический состав, % мас., металла в печи перед выпуском и в ковше после обработки РСА

Номер плавки	Место отбора проб	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Al
41417	Печь	1,05	0,35	12,3	0,055	1,01	0,18	—
	Ковш	1,03	0,27	13,5	0,062	1,03	0,18	0,13
41424	Печь	1,15	0,42	12,0	0,056	1,13	0,20	0,008
	Ковш	1,12	0,31	12,7	0,061	1,13	0,20	0,04
41444	Печь	1,13	0,30	11,4	0,063	0,72	0,15	0,006
	Ковш	1,12	0,27	13,1	0,070	0,70	0,15	0,033

5. Результаты статистической обработки химических составов шлаков

Компонент шлака	Число наблюдений	Содержание, %			Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации
		Среднее	Минимум	Максимум			
FeO	165	0,78909	0,600000	1,10000	0,015124	0,122980	15,58507
MnO		10,49879	6,200000	19,50000	6,898901	2,626576	25,01790

После внедрения новой технологии плавки методом переplava провели статистическую обработку химических составов шлаков 165 плавков. Для снижения трудоемкости исследований анализировали концентрации MnO и FeO в шлаках, являющиеся одним из основных индикаторов качества металла. Результаты статистической об-

работки представлены в табл. 5 и наглядно представлены гистограммами на рис. 4.

Как видно из данных табл. 5, содержание FeO в шлаках более стабильно и предпочтительнее, так как большинство их значений ≤ 1 %. Содержание MnO в шлаках менее стабильно, 22 % шлаков содержат концентрации

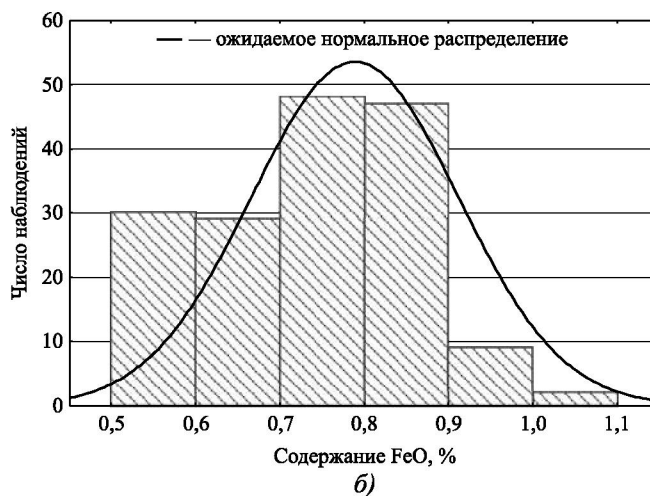
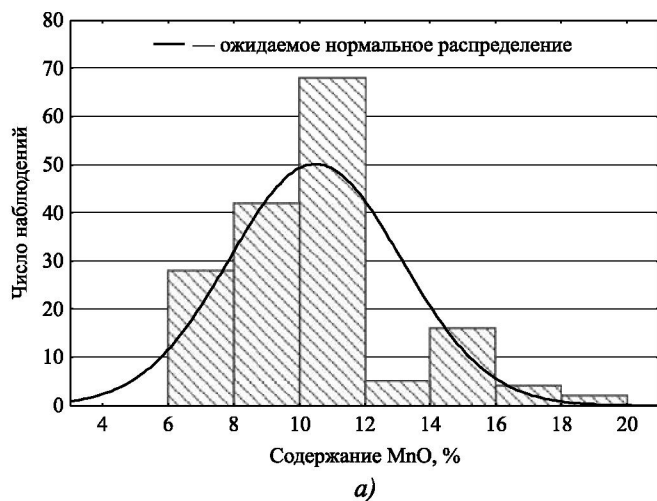


Рис. 4. Гистограмма распределения MnO (а) и FeO (б) в шлаках

оксидов более 12 %. В основном это плавки с неблагоприятной собственной шихтой из неочищенного возврата.

Химический состав плавок соответствовал требованиям ГОСТ. Микроструктура и механические свойства стали отвечали требованиям НТД на отливки.

Внедрение новой технологии выплавки марганцевой стали позволило существенно повысить качество металла, выплавленного методом переплава, расширить номенклатуру отливок, выплавляемых этим методом, и получить годовой экономический эффект свыше 3 млн руб.

Результаты работы успешно применяют также в АО "Рубцовский филиал "Алтайвагон".

Выводы

1. Разработана новая технология плавки высокомарганцевой стали 110Г13Л методом переплава с помощью новых материалов производства ООО "Металлург" СРО РАЛ для раннего наведения шлака с помощью РШ, замены молотого ферросилиция ФС65 на дисперсный раскислитель РДА во время диффузионного раскисления стали и внепечной обработки расплава рафинирующей смесью РСА.

2. Новая технология обеспечила:

- сокращение времени наведения шлакового покрова;
- сокращение времени расплавления шихты;
- уменьшение расхода электроэнергии;
- повышение эффективности диффузионного раскисления и снижение затрат на него;
- снижение расхода марганецсодержащих ферросплавов.

3. Повышено качество высокомарганцевой стали и расширена номенклатура отливок, выплавляемых методом переплава.

4. Экономический эффект от внедрения технологии составил более 3 млн руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дибров И.А.** Состояние и перспективные направления развития литейного производства России // Труды XII съезда литейщиков России. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. 520 с.

2. **Выплавка** высокомарганцевистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 1 / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Е.В. Сеницкий, Д.А. Горленко, Н.А. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 10. С. 735—739.

3. **Давыдов Н.Г.** Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.

4. **Исследование** возможности повышения надежности литых крупногабаритных изделий для горного оборудования / Т.Р. Гильманшина, Д.Ю. Крицкий, С.И. Тюрин и др. // Интернет-журнал "Наукоедение". 2017. Т. 9. № 2. <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN217.pdf>.

5. **Chena C., Zhang F., Wang F. et al.** Effect of N + Cr alloying on the microstructures and tensile properties of Hadfield steel // Materials Science & Engineering. 2017. 679. P. 95—103.

6. **Chen C., Bo L., Feng X. et al.** Strain hardening and nanocrystallization behaviors in Hadfield steel subjected to surface severe plastic deformation // Materials Science & Engineering. 2018. 729. P. 178—184.

7. **Mohamed K.** Ladle-treated high manganese steel reinforced by Cr7C3 phase // International journal of cast metals research. 2017. Vol. 30. Iss. 2. P. 81—86.

8. **Сидняев Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2014. 495 с.

9. **Совершенствование** технологии выплавки стали 110Г13Л / Гребнев Ю.В., Габельченко Н.И., Хмуров И.А. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 9. Вып. 9. С. 129—132.

10. **Срнительный** анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленных с применением различных модификаторов и раскислительных смесей / В.А. Чайкин, А.В. Чайкин, В.С. Лозов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 19—25.

11. **Новый** материал для диффузионного раскисления в агрегате комплексной обработки сталей / В.А. Чайкин, А.В. Чайкин, А.Д. Касимгазинов, П.О. Быков // Черные металлы. 2018. № 9. С. 6—11.

12. **Выплавка** высокомарганцевистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 2 / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Е.В. Сеницкий, Д.А. Горленко, Н.А. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 23—28.

13. **Mechanisms** of cast structure and stressed state formation in Hadfield steel / D. Gorlenko, K. Vdovin, N. Feoktistov // Overseas Foundry. November 2016. Vol. 13. Iss. 6. P. 433—442.

14. **Кожухов А.А.** Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП // Электрометаллургия. 2015. № 6. С. 3—9.

15. **Технологические** процессы производства стали: учебник / В.А. Кудрин, В.А. Шишимиров. Ростов н/Д.: Феникс, 2017. 302 с.

Владислав Васильевич Колпаков;

Андрей Владимирович Чайкин, канд. техн. наук;

Владимир Андреевич Чайкин, д-р техн. наук,

sro_ral@mail.ru;

Константин Николаевич Вдовин, д-р техн. наук