



## РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКИСЛЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15СГ-В ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦЕМ МнС25\*

**А. И. Панченко, И. Н. Логозинский, А. С. Сальников,  
С. Л. Мазурук, С. А. Касьян, С. С. Казаков,  
Л. М. Скрипка, М. И. Гасик, А. П. Горобец, О. Н. Сезоненко**

Изложены результаты опытно-промышленного освоения выплавки подшипниковой стали ШХ15СГ-В путем применения ферросиликомарганца МнС25 (ДСТУ 3548–97) с массовой долей кальция не более 0,1 % вместо ферромарганца ФМн78А (ДСТУ 3547–97) и ферросилиция ФС65 (ДСТУ 4127-2002) с высоким (до 0,5 %) и нестабильным содержанием кальция. Использование отечественных ферросплавов взамен импортного ферросилиция, согласно разработанной инновационной технологии выплавки и внепечной обработке стали и обеспечивает существенное повышение выхода годного, способствует снижению загрязненности заготовок и сортового проката глобулярными и оксидными включениями.

Results of experimental-industrial mastering of melting bearing steel ShKh15SG-V by application of ferro-silico-manganese MnS25 (DSTU 3548–97) with a mass share of calcium of not more than 0.1% are described. Ferromanganese FMn78A (DSTU 3547–97) and ferrosilicium FS65 (DSTU 4127-2002) with a high (up to 0.5%) and instable content of calcium are described. The use of national ferroalloys instead of imported ferrosilicium using developed innovation technology of melting and ladle steel treatment guarantees the great increase in yield of the efficient metal and promotes the decrease in contamination of billets and section rolled metal with globular and oxide inclusions.

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь ШХ15СГ-В; дуговая основная электропечь; технология выплавки стали; легирование и раскисление стали ферросиликомарганцем; внепечная обработка; твердые шлакообразующие материалы; ковша-печь, ковшовый вакууматор, качество заготовки и сортового проката; глобулярные, оксидные включения; экономия ферросплавов

**Постановка задачи.** Одним из направлений маркетинговой стратегии ОАО «Днепроспецсталь» является наращивание производства подшипниковой стали для ОАО «Харьковский подшипниковый завод» (ХарП). Последний планирует организовать поставки продукции для ряда ведущих автомобильных концернов («Тойота», «Ниссан», «Фольксваген»), открывающих свои филиалы в России, и освоить производство крупногабаритных подшипников повышенной точности для подвижного состава МПС стран СНГ.

Производство стали для крупногабаритных подшипников с повышенной прокаливаемостью, обеспечиваемой в стали ШХ15СГ (ГОСТ 3756–73) массовой долей марганца 0,90...1,20, кремния 0,40...0,65 %, в стали ШХ15 — соответственно 0,20...0,40 и 0,17...0,37 % является более сложным, чем других видов подшипниковых сталей, в аспекте технико-экономических показателей сквозной технологии выплавки и внепечной обработки металла.

В статье [1] изложены и проанализированы результаты технологии выплавки и внепечной обработки стали ШХ15СГ-В с применением, вместо отечественного ферросилиция ФС65 (ДСТУ 4127-2002) содержащего 0,3...0,5 % Са [2, 3], импортного 75%-го ферросилиция (Са ≤ 0,1 %). Установлено, что использование для опытной кампании импортного ферросилиция и ферромарганца марки ФМн78А (ДСТУ 3547–97) с внепечной обработкой металла,

\*Работа выполнена под общим и научным руководством академика НАНУ М. И. Гасика.

согласно действующей на ОАО «Днепроспецсталь» сквозной технологии производства стали ШХ15СГ-В, не позволило повысить качество стали со стабильно низкими баллами по глобулярным и оксидным включениям. При оценке качества металла (ГОСТ 801–78 и ASTM E45, метод А) относительно глобулярных видов включений установлено, что некоторое снижение загрязненности заготовок и сортового проката сопровождалось повышением баллов по оксидным включениям. Таким образом, предполагаемого существенного повышения выхода годного сортового проката сопоставимой геометрической размерности не достигли [1].

Особо следует отметить, что постоянно возрастающие требования потребителей подшипникового металла к качеству металлопродукции обуславливают необходимость продолжения научных поисков и разработки новых технологий для повышения степени чистоты стали от неметаллических включений. Многочисленными исследованиями [2, 3] микро- и макроструктуры подшипниковой стали и стендовыми испытаниями качества металла установлено опасное влияние неметаллических включений на эксплуатационные характеристики подшипников. Возникающее в зоне контакта тел качения с кольцами подшипника объемно-напряженное состояние металла, приводящее к изменению металлофизических свойств вплоть до структурных изменений стали в зоне контакта в системе пары шар (ролик)–кольцо, вызывает некогерентность упругоэластических свойств межфазной границы включения–металлическая матрица с последующим развитием питтинга (выкрашивания металла).

В работе [4] представлена взаимосвязь индекса опасности и размеров различных химико-минералогических включений (рис. 1). Наибольшую опасность в аспекте снижения долговечности эксплуатации подшипников вызывают крупноразмерные, труднодеформируемые в ходе прокатки металла, включения, сохраняющие в готовой металлопродукции форму глобулей. Неметаллические включения представляют собой гомогенные по структуре алюминаты кальция, гетерофазные комплексы, включающие соединения (растворы) системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  и шпинелидные фазы  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{O}(\text{Al}, \text{Cr}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$ . Как правило, при анализе условий формирования включений устанавливается приоритет абсолютных содержаний растворенного в металле кислорода и

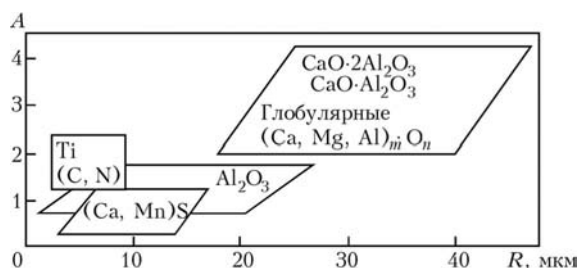


Рис. 1. Влияние химико-минералогической природы и размера включений  $R$  на эксплуатационные характеристики подшипников [4];  $A$  — индекс опасности

элемента-раскислителя. В то же время особое значение приобретает соотношение активностей как элементов-раскислителей ( $a_{\text{Mn}}$ ,  $a_{\text{Si}}$ ,  $a_{\text{Al}}$ ), так и неконтролируемых стандартами в ходе выплавки и внепечной обработки ( $a_{\text{Mg}}$ ,  $a_{\text{Ca}}$ ) [5–7]. С изменением соотношения активностей раскислителей в ходе раскисления жидкой стали и во время затвердевания металла кристаллизация и твердофазные реакции формирования оксидных фаз происходят в определенных областях фазовых равновесий системы  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .

Содержание, химико-минералогический состав и размеры неметаллических включений зависят от ряда следующих приоритетных факторов: термодинамической активности применяемых раскислителей и их состава, температурно-временных режимов раскисления и внепечной обработки металла, способов разлива стали, ограничения вторичного окисления, качества сифонного припаса (высокой огнеупорности и малой эрозии), развеса слитков (продолжительности кристаллизации металла) и геометрической размерности сортового проката, влияющей на деформируемость включений.

**Физико-химический аудит действующей технологии выплавки и рафинирования стали.** Физико-химический аудит процессов выплавки и внепечной обработки стали ШХ15СГ-В, проведенный по действующей технологии с использованием отечественного ферросилиция ФС65 и опытной технологии с применением импортного низкокальциевого 75%-го ферросилиция, позволил выявить недостатки сквозной технологии на стадиях легирования и раскисления жидкой стали и обосновать инновационную сквозную технологию производства стали ШХ15СГ-В в условиях ОАО «Днепроспецсталь» [8, 9].

Теоретический анализ процессов и материальный баланс раскислителей стали (кальция и алюминия) на всех стадиях внепечной обработки показали, что «избыточное» количество кальция при разливе и кристаллизации металла в изложнице (развес слитка 3,6 т) хотя и обеспечивает с остаточным (растворенным) алюминием относительно низкое содержание растворенного («активного») кислорода, но вместе с тем в значительной мере ответственно за формирование увеличенных количества и размеров глобулярных включений в стали как гомогенных на основе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и гетерогенных на основе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$  (рис. 2, табл. 1).

Исследования, проведенные на заводе «Днепроспецсталь» показали, что из-за относительно высокого содержания в ферросилиции ФС65 кальция, концентрация его в жидкой стали после присадки ферросилиция в металл при обработке в ковше-печи повышается до значений, превышающих критическое. Это стало основанием для проведения опытных промышленных плавок стали ШХ15СГ-В по различным вариантам раскисления алюминием и присадки ферросилиция ФС65 в металл (в печь, ковшепечь, вакууматор или присадки по частям от общего

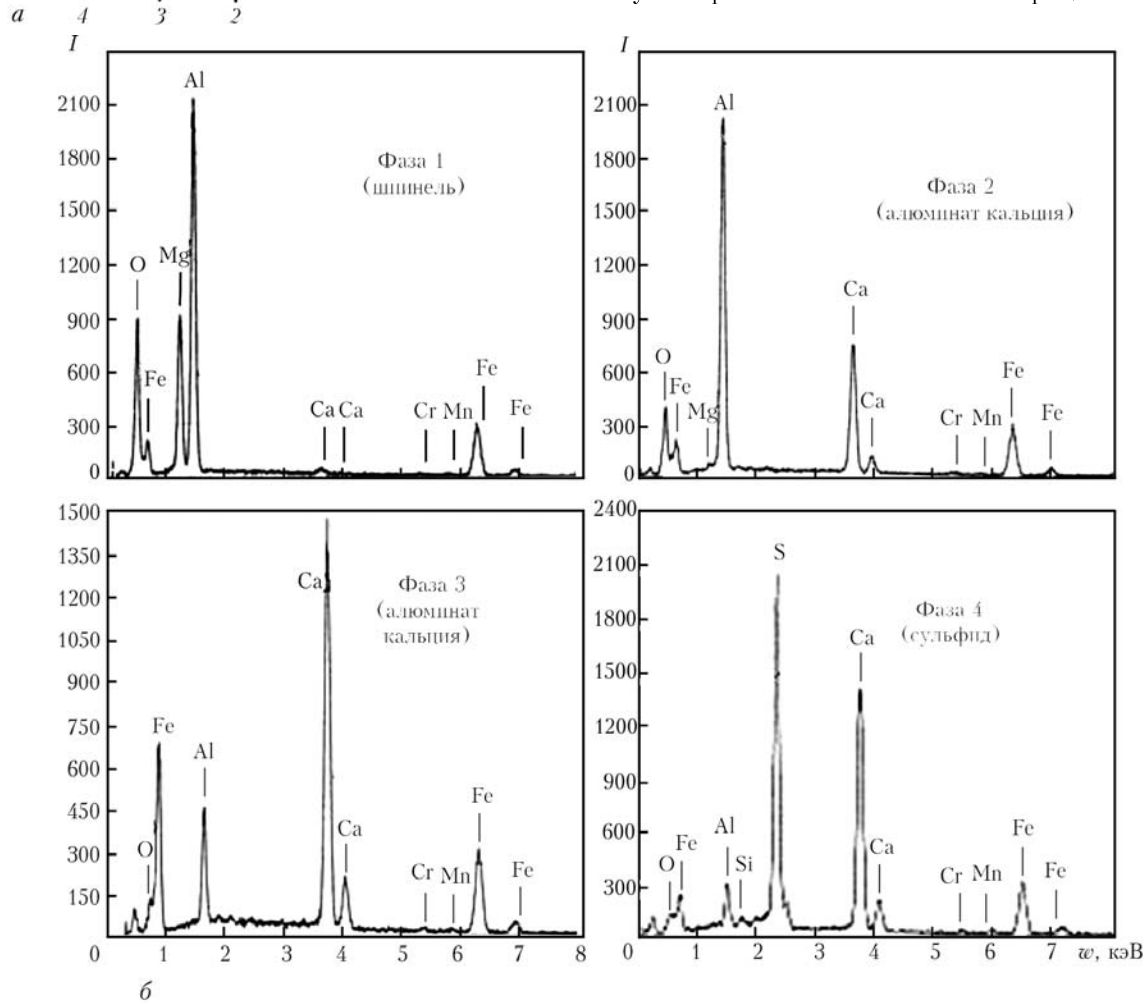
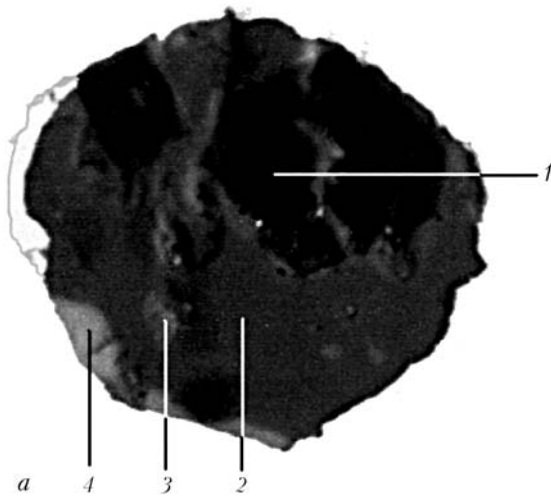


Рис. 2. Глобулярное гетерофазное включение в стали ШХ15СГ-В: а – оптическое изображение,  $\times 1500$ ; б – энергетические спектры элементов в  $K_{\alpha}$ -излучении  $\omega$ : 1 – 4 – анализируемые фазы; I – импульс

Фаза	Массовая доля элементов, %							
	Mg	Al	Ca	Si	Cr	Mn	Fe	O
1	11,34	24,89	0,52	–	0,26	0,32	25,37	37,29
2	0,33	22,41	18,71	–	0,36	–	23,63	34,56
3	–	5,57	37,62	–	0,78	–	27,76	28,28
4	–	1,76	23,54	0,21	0,32	S	17,28	40,63
						16,26		



**Таблица 2. Химический состав стали ШХ15СГ-В на стадиях выплавки и внепечной обработки в ковше-печи и ковшовом вакууматоре**

Стадия технологии	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	Ca, ppm
Перед выпуском из ДСП*	0,75	0,15	0,13	1,200	0,011	0,045	0,004	4,0
В начале обработки в ковше-печи (после присадки ФС65)	0,95	0,17	0,20	0,014	0,018	0,040	0,040	5,0
В конце обработки в ковше-печи	0,99	1,00	0,48	1,430	0,014	0,009	0,045	13,8
В конце обработки в вакууматоре	0,99	1,00	0,48	1,430	0,014	0,005	0,033	10,6

\* Дуговая сталеплавильная печь.

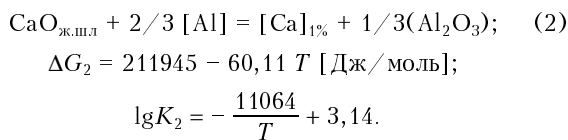
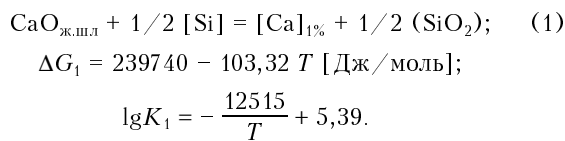
**Таблица 3. Химический состав шлака на различных стадиях технологии производства стали ШХ15СГ-В**

Период выплавки	Массовая доля компонентов, %				
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO
Перед выпуском из ДСП	45	15	3	7	2,5
В начале обработки в ковше-печи (после присадки ФС65)	50	9	13	8	1,0
В конце обработки в ковше-печи	55	7	9	10	0,3
В конце обработки в вакууматоре	55	7	10	15	0,3

шлак–металл, инициируемые реакциями восстановления с участием компонентов металлической ванны и оксидно-фторидного шлака.

Источником поступления «избыточного» кальция в металл являются процессы восстановления кальция из расплава CaO–CaF<sub>2</sub> кремнием ферросилиция ФС65, алюминием в составе ФС65 (1,5... 2,0 %) и порошком алюминия при раскислении шлака в ходе вакуумирования металла.

Восстановление кальция на стадии внепечной обработки может быть в обобщенном виде представлено следующими реакциями:



Термодинамические характеристики реакций (1) и (2) рассчитаны с учетом теплоты растворения и перехода компонентов из стандартного состояния «чистое вещество» в идеальный бесконечно разбавленный 1%-й раствор в железе [10].

Определяя по методу А. Г. Пономаренко [10] активности компонентов металла и шлака (табл. 3) как фазы с коллективизированным состоянием электронов, установили, что значения активностей оксидов при 1600 °С составляют 0,345 для 50 % CaO; 0,137 для 10 % SiO<sub>2</sub> и 0,048 для 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Тогда химический потенциал ( $\mu_i = \frac{\Delta G_{T,i}}{d_{in}}$ ) образования растворов кальция с содержанием 10 ppm по реакциям (1) и (2) при условии равенства химических потенциалов элементов, растворенных в металле и шлаковой фазе, приобретает следующие значения:

T, °С	1600	1700	2000	2200
$\mu_{\text{Ca}}^{(1)}$ , Дж	1,31	1,32	0,17	- 0,55
$\mu_{\text{Ca}}^{(2)}$ , Дж	3,60	3,38	2,73	2,29

Анализ термодинамических данных и теоретические расчеты подтверждают преобладающее влияние кремния на процессы восстановления кальция и обозначают технологические факторы для ограничения этого процесса снижением основности шлака и повышением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Особо следует отметить, что соблюдение режима получения стали с рациональным содержанием кальция в жидком металле является необходимым, но не достаточным условием производства сортового проката с регламентированными баллами загрязненности металла глобулярными и оксидными включениями по высшим группам качества. Поэтому очень важно создать наиболее благоприятное состояние металла, предшествующее легированию, раскислению и внепечной обработке стального полупродукта в ДСП-60, ковше-печи и вакууматоре для образования первичных в жидкой стали и вторичных неметаллических включений в интервале ликвидус–солидус при кристаллизации металла в изложнице.

Термодинамическим анализом и экспериментальными исследованиями установлено, что при раздельном раскислении жидкого железа марганцем (ферромарганцем) образуются оксиды (Mn, Fe)O

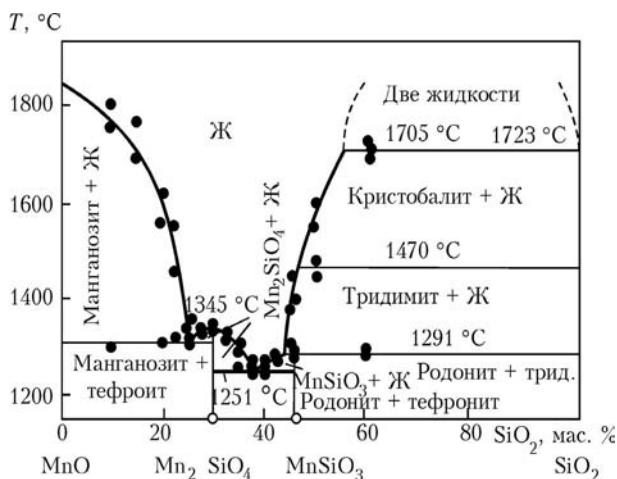


Рис. 3. Диаграмма состояния MnO-SiO<sub>2</sub> [12]

или чистый оксид марганца с температурой плавления 1850 °С. В системе Fe-Mn-O при содержании марганца в расплаве 0,02 % моль. доли (1,9 мас. %) равновесная концентрация оксида марганца в шлаковой фазе достигает 89,8 мас % [11]. В случае раскисления железа кремнием (ферросилицием) продуктом реакции является SiO<sub>2</sub> с температурой плавления 1720 °С. Совмещенное легирование и предварительное раскисление с применением комплексного сплава ферросиликомарганца сопровождается образованием (при определенных массовых долях марганца и кремния в ферросплаве и в жидком железе) легкоплавких продуктов реакции системы MnO-SiO<sub>2</sub> (рис. 3) эвтектического состава с температурой 1320 °С [12]. Это положение термодинамически обосновано и экспериментально подтверждено в монографии [13], а позже в работе [14]. Причем согласно монографии, жидкие неметаллические

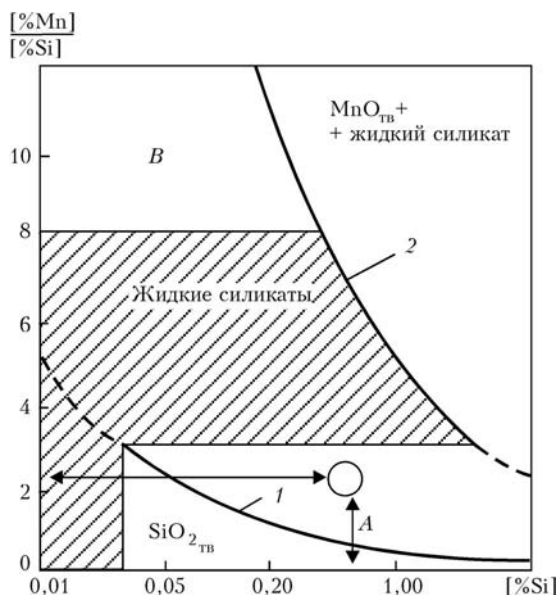


Рис. 4. Области твердых и жидких продуктов раскисления марганцем и кремнием при 1600 °С [13]: 1 — силикаты марганца, насыщенные кремнеземом, отделены от твердого кремнезема; 2 — жидкие силикаты марганца, отделены от твердых растворов на основе оксида марганца; А — продукты реакции раскисления находятся в твердо-жидком состоянии; В — образование частиц твердого оксида марганца; О — состав продуктов реакции раскисления для соотношения [%Mn]/[%Si] в стали ШХ15СГ-В

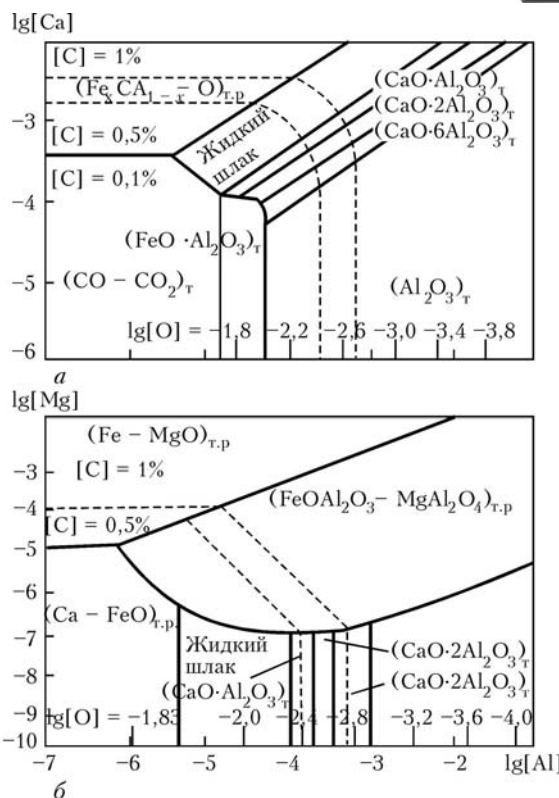


Рис. 5. Поверхности растворимости компонентов в жидком металле систем Fe-C-O-Al-Ca при 1550 °С [15, 16] (а) и Fe-C-O-Al-Ca-Mg при 1550 °С, 5 ppm [Ca] [17] (б)

включения образуются при температурах сталеварения в случае соотношения в металле [% Mn] и [% Si] как 3...8 (рис. 4).

Таким образом, если легирование и предварительное раскисление металла-полупродукта как основы стали ШХ15СГ-В производить ферросиликомарганцем с определенным соотношением марганца и кремния, в котором практически отсутствует растворенный кальций, можно создать предпосылки для образования и удаления большей части первичных неметаллических включений и получения металла с пониженным содержанием растворенного кислорода. В дальнейшем, при вводе алюминия на стадии обработки металла в ковше-печи и в ковшовом вакууматоре, должны обеспечиваться термодинамически более стабильные условия для получения стали с пониженным содержанием и глобулярных, и оксидных включений. Соотношение между количеством этих двух видов включений во многом определяется как остаточным содержанием растворенных кальция и алюминия, так и соотношением их концентраций, т. е. [%Al] : [%Ca]. Из диаграммы (рис. 5, а), иллюстрирующей фазовые равновесия в системе Fe-C-O-Al-Ca на поверхности растворимости компонентов в жидком металле, следует, что изменение количества кальция и алюминия в жидком металле приводит к формированию различных первичных включений морфологического типа: гомогенных жидкофазных растворов системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алюминатов кальция mCaO·nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Участие магния в формировании шпинельных и гетерофазных алюмокальциевых включений.** В работах [5–7] изучено влияние растворенного в подшпикниковой стали магния на формирование глобулярных гетерофазных включений, представленных шпинелью  $MgO \cdot Al_2O_3$  как самостоятельной фазой, так и шпинелидами  $(Mg, Fe^{2+})O \cdot (Al^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+})_2O_3$ . Источником поступления магния в расплав при выплавке как стали в основных электропечах [18], так и ферросплавов (например, получение металлического марганца силикотермическим способом [12]) являются процессы восстановления магния углеродом [19], кремнием и алюминием из  $MgO$ -содержащих футеровок печи и шлакового пояса ковша в ходе внепечной обработки.

Согласно данным работы [20], шпинель  $MgO \cdot Al_2O_3$  в аустенитных сталях образуется при содержаниях  $[Mg]$  и  $[Al]$ , равных соответственно 1 и 10 ppm ( $T = 1873$  К). Для исключения формирования шпинели предлагается контролировать содержание  $[Mg]$  и  $[Al]$  следующим образом:

заменой  $Al_2O_3$ – $MgO$ -футеровки стен и днища ковша на доломитовую;

уменьшением содержания алюминия в используемом ферросилиции от 1 до 0,01 мас. %;

снижением содержания  $Al_2O_3$  в шлаке на выпуске из электродуговой печи от 17...23 до 5 мас. %, обновлением шлака перед обработкой на установке ковш-печь и достижением 2 мас. %  $Al_2O_3$  после обработки вместо 7 мас. % по действующей технологии.

Прецизионными исследованиями [21] подтверждено участие магния в трансформации первоначально сформировавшихся включений корунда в гетерофазную структуру, ядром которой является корунд с оторочкой шпинелью  $MgO \cdot Al_2O_3$ . Кристаллохимическая структура многофазных оксидных включений определяется физико-химическим состоянием ванны, очередностью ввода раскислителей и взаимодействием растворенных в металле элементов.

Правомочность положений о закономерностях формирования гетерофазных включений, определяемых отношением активностей растворенных элементов-раскислителей, подтверждена результатами исследований по раскислению металла магнием [22] и при обработке стали ШХ15СГ-В магнием в составе железокремниймагниевой (8 % Mg) лигатуры [6].

При вводе до 0,3 кг/т магния в стали ШХ15СГ-В опытных плавов изменялась кристаллохимическая структура оксидных включений, что обусловлено перераспределением элементов-раскислителей в процессе формирования алюмокальциевых и шпинельных фаз. Идентификация составов включений методами микрорентгеноспектрального анализа обнаружила следующее в интенсивности характеристического рентгеновского излучения  $K_{\alpha}$  элементов:

$$(J_{Ca}/J_{Al}) \cdot 10^3 \quad (J_{Mg}/J_{Al}) \cdot 10^3$$

действующая технология с обработкой металла синтетическим известковоглиноземистым шлаком

441                      458

обработка металла магнией-содержащей лигатурой в сочетании с синтетическим шлаком

136                      1259

Методами оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что повышение содержания магния в расплаве (48 и 25 ppm в металле соответственно опытных плавов и полученном по действующей технологии) ограничило образование шпинели  $MgO \cdot Al_2O_3$  как самостоятельной структуры и создало предпосылки для формирования в составе гетерофазных оксидных включений твердых растворов  $(Fe, Al, Mg)O$ .

Результаты выполненных исследований подтверждаются термодинамической моделью реакций взаимодействия растворенных в металле кальция, магния, алюминия, углерода с кислородом (рис. 5, б), устанавливающей соотношения указанных элементов для образования твердых растворов шпинельного ряда и жидкофазных продуктов раскисления в виде алюминатов кальция.

**Основные положения и варианты разработанной технологии легирования и раскисления стали ферросиликомарганцем MnС25.** Анализ результатов системных исследований процессов формирования оксидных фаз в структуре неметаллических включений, влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки сталей подшпикникового сортамента на качество металлопродукции послужило основой для разработки технологии легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В, обеспечивающей регламентный состав гетерофазных глобулярных включений и снижение общего уровня загрязненности металла включениями.

В ходе промышленного освоения технологии раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В использовали ферросиликомарганец MnС25 (ДСТУ 3548-97) производства ОАО «ЗФЗ». Химический состав ферросплавов MnС25, ФМn78 и ФС65 приведен в табл. 4. Как следует из данных табл. 4, содержание кальция и алюминия в MnС25, участвующих в процессе раскисления и формирования глобулярных алюмокальциевых включений, в 10...20 раз меньше, чем в составе ФС65. Поэтому при раскислении и легировании металла ферросиликомарганцем MnС25 (0,01 % Ca) в сталь вводят на порядок меньше кальция, чем при использовании ФС65 (0,42 % Ca) по действующей технологии.

В рамках настоящей работы проведено 15 опытно-промышленных плавов в дуговой основной электропечи ДСП-60 по пяти технологическим вариантам с использованием ферросиликомарганца MnС25, различающихся как последовательностью присадок его в печь, в ковш на выпуске плавки или на стадии обработки стали в ковше-печи, так и вводом корректирующих добавок (ферромарганца и ферросилиция) и алюминия на различных стадиях (в ковше-печи и ковшевом вакууматоре) внепечной обработки стали (табл. 5).

*Вариант 1.* Металл-полупродукт легировали в печи углеродистым феррохромом, предварительно раскислив ванну примерно 1 кг/т алюминия, затем выпускали в ковш с отсечкой печного шлака и на-



Таблица 4. Химический состав ферросплавов, использованных при проведении опытных плавов стали ШХ15СГ-В

Материал	Массовая доля элементов, %																	
	C	Mn	Si	P	S	Ca	Ni	Mo	Ti	Al	Cu	As	Pb	Sn	Zn	[O]	[N]	[H], ppm
МнС25	0,32	71,3	25,0	0,075	0,018	0,010	0,020	0,023	0,19	0,083	0,016	0,016	0,012	0,0013	0,033	0,023	0,001	15
ФМн78	6,30	79,1	1,80	0,230	0,020	0,022	0,062	0,025	0,08	0,086	0,027	0,030	0,014	0,0015	0,035	0,130	0,040	46
ФС65	0,08	0,27	64,0	0,023	0,003	0,420	0,100	0,036	0,20	2,00	0,083	0,020	0,015	0,0009	0,037	0,047	0,004	14

Таблица 5. Технологические режимы раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В опытных плавов с применением МнС25

Вариант	Количество плавов	ДСП-50	[Ca], ppm	Ковш	Ковш-печь	[Ca], ppm	ВД	[Ca], ppm	[Ca], ppm в готовом металле	% выпалов O+S+Гл	Выход годного
1	1	Al	4,0	SiMn; Al	ФС; Al	12,0	Al	13,0	10,0	40,9	0
2	4	Al	3,5	SiMn; ФС	Al	6,8	Al	6,8	6,7	31,3	57
3	1	SiMn	3,0	Al	ФС; Al	25,0	Al	20,0	10,0	0	100
4	2	-	4,0	Al	SiMn; ФС; Al	10,0	Al	-	8,5	6,7	100
5	7	ФС	4,7	SiMn; ФС; Al	ФС; Al	7,3	Al	9,0	7,1	9,2	89
Действующая технология	-	ФС	4,0	Al	ФС; ФМн; Al	13,8	Al	10,6	9,6	15,9	64

ведением в ковше оксидно-фторидного шлака системы CaO–CaF<sub>2</sub> с соотношением компонентов 4:1. В ходе выпуска полупродукта в ковш присаживали ферросиликомарганец Мн25. Корректировку содержания марганца и кремния приносили в ков-

ше-печи. Из-за несоответствия содержания углерода в стали на стадии обработки металла в ковшовом вакууматоре вследствие малой доли поступления углерода с присадкой МнС25 (% С<0,35 %) сталь в ковше науглероживали порошком кокса, что не пре-

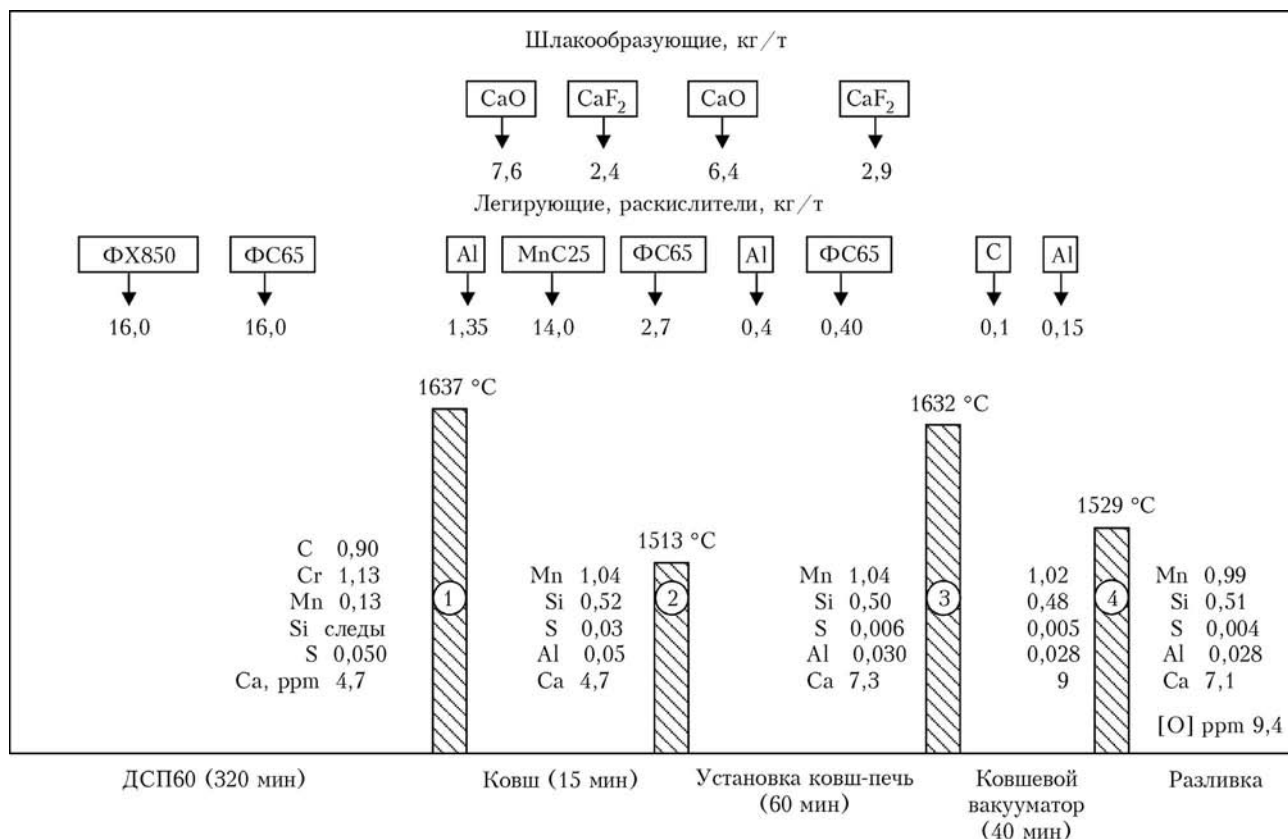


Рис. 6. Характеристика процесса легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем ФМнС25: 1 – на выпуске из ДСП-60; 2 – перед обработкой в ковше-печи; 3 – в конце обработки в ковше-печи; 4 – после вакуумирования



Таблица 6. Изменение химического состава шлаков на стадиях внепечной обработки стали ШХ15СГ-В по варианту 5

Номер плавки	Номер пробы	Массовая доля компонентов, %							
		CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	S	CaF <sub>2</sub>
B15656	1	46,83	18,2	16,4	15,70	0,37	<0,15	0,47	8,72
	2	59,95	6,36	10,0	17,44	0,30	0,92	0,12	13,55
	3	53,75	7,00	12,8	17,22	<0,30	0,54	0,09	9,68
	4	50,83	13,4	10,2	17,20	<0,30	<0,15	0,20	6,00
B15710	1	48,20	7,60	9,8	15,40	<0,30	0,84	0,51	12,20
	2	53,00	8,00	7,6	15,30	<0,30	0,78	0,24	15,67
	3	53,00	9,40	8,9	16,30	<0,30	0,15	–	–
	4	50,40	10,40	13,2	15,40	<0,30	<0,15	0,71	7,74
B15775	1	57,50	10,70	16,4	14,77	0,54	0,15	0,82	8,13
	2	>61,80	6,82	14,2	15,30	0,50	1,15	0,24	7,94
	3	55,43	11,91	15,9	15,82	0,48	<0,15	0,14	8,72
	4	53,09	11,24	16,5	15,10	0,46	<0,15	0,49	8,72

Примечание. Проба № 1 — после обработки металла ТШМ в ковше, проба № 2 — в ковше-печи после обновления шлака, проба № 3 — в конце обработки в ковше-печи, проба № 4 — после вакуумирования.

дусмотрено действующей технологической инструкцией. Это способствовало повышенному загрязнению стали включениями, что учтено при анализе результатов сдаточного и исследовательского контроля заготовок и сортового проката.

**Вариант 2.** Аналогичен варианту 1, но вместе с твердыми шлакообразующими материалами (ТШМ)

и MnС25 (увеличено количество MnС25 до 850 кг на плавку) в ковш для корректировки присадили и 250 кг стандартного ФС65 на плавку.

**Вариант 3.** Особенностью этого варианта является присадка MnС25 в печь ДСП-60 перед выпуском. Корректировку химического состава металла производили в печи-ковше.

Таблица 7. Содержание элементов по ходу опытных плавков стали ШХ15СГ-В

Номер плавки	Печь на выпуске	Mn, %					Si, %				
		Ковш-печь			Вакууматор	Ковш	Ковш-печь			Вакууматор	Ковш
		1*	2*	3*			1*	2*	3*		
<i>Вариант 1</i>											
B14608	0,09	0,84	1,06	1,07	1,06	1,04	0,20	0,19	0,35	0,46	0,45
<i>Вариант 2</i>											
B14618	0,12	1,04	1,09	–	1,04	1,05	0,51	0,45	–	0,48	0,49
B14680	0,13	1,07	1,05	–	1,05	1,00	0,56	0,50	–	0,50	0,50
B14690	0,12	1,04	1,03	–	1,00	1,01	0,51	0,43	–	0,50	0,51
B14859	0,11	1,04	1,13	–	1,10	1,08	0,51	0,56	–	0,57	0,57
Среднее	0,12	1,05	1,07	–	1,05	1,04	0,52	0,49	–	0,51	0,52
<i>Вариант 3</i>											
B15114	0,13	0,88	1,13	–	1,07	1,07	0,15	0,60	–	0,58	0,57
<i>Вариант 4</i>											
B15294	0,14	0,17	1,04	–	1,01	0,99	0,09	0,42	–	0,46	0,44
B15678	0,09	0,99	1,06	–	–	1,00	0,32	0,44	–	–	0,44
Среднее	0,12	0,58	1,05	–	1,01	0,99	0,21	0,43	–	0,46	0,44
<i>Вариант 5</i>											
B15155	0,16	1,07	1,07	1,04	1,03	1,01	0,46	0,44	0,46	0,47	0,48
B15656	0,17	1,08	1,07	1,06	1,05	1,06	0,49	0,47	0,46	0,50	0,51
B15710	0,13	1,03	1,01	–	1,04	1,03	0,49	0,46	–	0,48	0,48
B15743	0,09	1,02	1,02	–	–	0,96	0,67	0,56	–	–	0,56
B15744	0,13	1,03	1,02	–	–	0,98	0,43	0,50	–	–	0,51
B15775	0,09	1,02	1,01	1,02	–	0,97	0,63	0,61	0,59	–	0,60
B15788	0,14	1,01	1,00	–	0,94	0,93	0,44	0,47	–	0,48	0,45
Среднее	0,13	1,04	1,03	1,04	1,02	0,99	0,52	0,50	0,50	0,48	0,51

\*Номера проб.





Продолжение табл. 7.

Номер плавки	Са, ppm					Вакууматор	Ковш	Al, %, ковш	S, %, ковш	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> , ppm, прокат
	Печь на выпуске	Ковш-печь								
		1	2	3						
<i>Вариант 1</i>										
B14608	4	6	6	12	13	10	0,024	0,002	8/80	
<i>Вариант 2</i>										
B14618	4	11	5	—	5	7	0,025	0,003	8/70	
B14680	3	7	7	—	5	4	0,025	0,003	8/70	
B14690	4	5	4	—	7	7	0,029	0,006	10/70	
B14859	3	7	11	—	10	9	0,034	0,005	8/70	
Среднее	3,5	7,5	6,8	—	6,8	6,7	0,028	0,004	8,5/70	
<i>Вариант 3</i>										
B15114	3	6	25	—	20	10	0,033	0,003	10/90	
<i>Вариант 4</i>										
B15294	—	—	—	—	—	9	0,028	0,003	9/70	
B15678	4	4	10	—	—	8	0,022	0,007	9/80	
Среднее	4	4	10	—	—	8,5	0,025	0,006	9/75	
<i>Вариант 5</i>										
B15155	3	9	5	10	8	7	0,041	0,004	10/80	
B15656	8	5	6	6	8	10	0,030	0,003	9/70	
B15710	4/9	5	6	—	6	6	0,028	0,004	10/80	
B15743	6	5	5	—	—	5	0,029	0,003	10/80	
B15744	4	6	8	—	—	9	0,022	0,003	9/80	
B15775	4	5	6	6	—	6	0,024	0,004	9/80	
B15788	4	5	12	—	14	7	0,024	0,005	9/90	
Среднее	4,7	5,7	6,9	7,3	9	7,1	0,028	0,004	9,4/80	

Примечание. В числителе указано значение кислорода, в знаменателе — азота.

*Вариант 4.* Отличие этого варианта от предыдущих заключается в присадке MnС25 в ковше-печи.

*Вариант 5.* Металл-полупродукт, частично раскисленный в печи ферросилицием ФС65, выпускали в ковш с одновременной присадкой MnС25, и раскисления алюминием на штангах. В печи-ковше сталь раскислялась алюминием, а окончательное раскисление производили в вакууматоре (рис. 6).

По ходу внепечной обработки стали производили анализ химического состава шлаков (табл. 6).

Разливку металла и дальнейший передел производили в соответствии с действующими технологическими инструкциями. Изменение содержания элементов в процессе выплавки стали показано в табл. 7.

**Результаты контроля качества заготовок и сортового проката опытных плавков стали ШХ15СГ-В.**

Анализ данных, представленных в табл. 7, свидетельствует о том, что разработанная технология раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем MnС25 обеспечила снижение содержания кальция в стали до 8,4 против 9,6 ppm в серийном металле, т. е. в среднем на 1,2 ppm. Лучшие результаты достигнуты на плавках вариантов 2 и 5 опытной технологии соответственно — 6,7 и 7,1 ppm, что обусловлено меньшим количеством корректирующих присадок ФС65 в ковше-печи (соответственно 30 и 25 кг на плавку). Содержание

алюминия, серы, азота и водорода в стали опытных плавков было как и в серийном металле.

Согласно техническим нормативам, отбор проб металла для контроля по неметаллическим включениям производили из прокатанных штанг одного слитка первого поддона и одного слитка последнего поддона. Горизонты отбора проб соответствовали головной (А), средней (Б) и донной (Н) частям каждого слитка. Контроль качества металла осуществляли методом максимального балла по шкалам ГОСТ 801–78, а для металла экспортного назначения, кроме того, — и по шкалам ASTM E45 (метод А).

Методология оценки металла по ASTM E45 (метод А) отличается приоритетом показателей по оксидным включениям, в то время как шкалы ГОСТ 801–78 предъявляют более жесткие требования по гетерофазным глобулярным включениям. Поэтому сравнительный анализ качества металла по двум нормативным документам является предметом дальнейших исследований.

Сводные показатели сдаточного и исследовательского контроля металла опытных плавков и полученного по действующей технологии (с применением ферросилиция ФС65 и ферромарганца ВМн78) по содержанию неметаллических включений приведены в табл. 8. Выполненный в рамках исследовательского контроля рентгеноспектральный микроанализ включений предельного балла по



Таблица 8. Результаты оценки качества металла опытных плавов стали ШХ15СГ-В по шкалам ГОСТ 801–78

Вариант технологии	Группа	Тип контроля	Количество, шт.		Выход годного, %	Вид неметаллических включений											
			партий	образцов		О			S			Г			О + S + Г		
						Средний балл	Образцы с выпадом		Средний балл	Образцы с выпадом		Средний балл	Образцы с выпадом		шт.	%	
							шт.	%		шт.	%		шт.	%			
1	I	Сдаточный	1	11	0	2,0	0	0	2,0	0	0	3,3	5	45,5	5	45,5	
		Исследуемый	1	11	0	1,8	1	9,1	1,9	0	0	2,5	3	27,3	4	36,4	
		Σ	1	22	0	1,9	1	4,5	1,95	0	0	2,9	8	36,4	9	40,9	
2	I	Сдаточный	3	25	33	2,2	9	36,0	1,8	0	0	1,9	6	24,0	15	60,0	
		Исследуемый	1	8	0	2,4	3	37,5	2,0	0	0	1,7	0	0	3	37,5	
		Σ	4	33	25	2,3	12	36,4	1,9	0	0	1,8	6	18,2	18	54,5	
	V	Сдаточный	1	12	100	2,6	0	0	2,3	0	0	2,3	1	8,3	1	8,3	
		Исследуемый	2	22	100	2,7	1	4,5	2,2	0	0	1,8	1	4,5	2	9,0	
		Σ	3	34	3	2,65	1	2,9	2,25	0	0	2,05	2	5,9	3	8,8	
I+V	Σ	7	67	57	–	13	19,4	–	0	0	–	8	11,9	21	31,3		
3	V	Исследуемый	1	8	100	1,9	0	0	2,1	0	0	2,4	0	0	0	0	
4	I	Сдаточный	1	6	100	1,8	0	0	1,5	0	0	1,5	0	0	0	0	
		»»	1	9	100	2,7	1	11,1	2,5	0	0	2,3	0	0	1	11,5	
		Σ	2	15	100	–	1	6,7	–	0	0	–	0	0	1	6,7	
5	I	Исследуемый	1	12	0	2,0	1	8,3	2,0	0	0	1,9	2	16,7	3	25,0	
		II	Сдаточный	2	24	100	1,95	0	0	1,55	0	0	2,0	1	4,2	1	4,2
		III	»»	1	6	100	2,1	0	0	2,0	0	0	1,7	0	0	0	0
		V	»»	5	45	100	2,45	2	4,4	2,3	0	0	2,35	2	4,4	4	8,9
		I+II+III+V	–	9	87	89	–	3	3,4	–	0	0	–	5	5,7	8	9,2
Действующая технология	I+II+III+V	Сдаточный	309	3538	64	–	160	4,5	–	5	0,1	–	398	11,2	563	15,9	

Примечание: 1. Здесь О – оксиды; S – сульфиды; Г – глобулы. 2. Нормативные требования ГОСТ 801–78, балл, не более:

	О	S	Г
I, II группа (профиль до 40 мм)	2,0	2,0	2,0
III, IV группа (профиль до 80 мм)	2,5	2,5	2,5
V группа (профиль более 80 мм)	3,0	3,0	3,0

шкалам ГОСТ 801–78 (I группа – балл > 2, V группа – балл > 3) показал, что состав глобулярных включений представлен гетерофазными образованиями, содержащими кальций, алюминий, магний, кремний, оксидные строчечные включения сформированы с участием элементов алюминия, кальция, магния, марганца и серы.

Критериями эффективности разработанной технологии раскисления и легирования стали ферросиликомарганцем MnC25 приняты показатели выхода годного металла с первого контроля, что исключает проведение повторного на удвоенном количестве образцов и переназначение металла для прокатки на другой профиль, а также количество образцов с выпадами по включениям (глобулы, оксиды, сульфиды).

Анализ данных, представленных в табл. 7 и 8, свидетельствует о том, что выплавка стали с при-

менением MnC25 по технологическому варианту 5 обеспечивает уменьшение кальция в опытном металле от 9,6 до 7,1 ppm (на 26 %) в сравнении с действующей технологией, а также снижение в 1,9 раза загрязненности глобулярными включениями (от 11,2 до 5,7 % выпадов), оксидными включениями (от 4,5 до 3,4 % выпадов) и повышение выхода годного металла с первого контроля от 64 до 89 % [23]. Приведенные показатели послужили основанием для определения рациональной схемы использования MnC25 для легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В по технологическому варианту 5 – выпуск полупродукта, частично раскисленного кремнием в печи с отсежкой печного шлака, легирование и раскисление MnC25 в процессе слива металла в ковш, раскисление в ковше алюминием на штангах и последующая внепечная обработка на



установках ковш-печь и вакууматоре под оксидно-фторидным шлаком (рис. 6).

Экономической эффективности разработанной технологии производства стали ШХ15СГ-В с раскислением и легированием ферросиликомарганцем MnС25 без учета повышения качества металла достигают в результате снижения на 5,3 кг/т суммарного количества ферросплавов (MnС25, корректирующие добавки ФМn78 и ФС65) при одновременном сокращении удельных расходов ферромарганца на 90 и ферросилиция на 56 %, в сравнении с действующей технологией.

Положительные результаты промышленной кампании производства стали ШХ15СГ-В с применением MnС25 служат предпосылкой для дальнейшего совершенствования сквозной технологии выплавки стали указанной марки с использованием ферросиликомарганца MnС25 в соотношении марганца и кремния как 3,2... 4,3, что является одним из решающих факторов в формировании жидкофазных первичных включений и обеспечивает повышение экономических показателей производства.

### Выводы

1. Освоена разработанная инновационная технология легирования и раскисления стали ШХ15СГ-В с применением ферросиликомарганца MnС25 (ДСТУ 3548–97) взамен ферромарганца ФМn78 и ферросилиция ФС65, обеспечивающая предварительное раскисление металла с образованием жидкофазных включений системы MnO–SiO<sub>2</sub>, позволяющая снизить уровень растворенного кислорода в условиях формирования оксидных фаз неметаллических включений при одновременном уменьшении соотношения [Ca]/[Al].

2. По результатам опытных плавов с использованием ферросиликомарганца MnС25 установлено, что рациональным вариантом технологической схемы производства стали ШХ15СГ-В является ввод MnС25 в ковш на сливе металла из печи (вариант 5), что приводит к снижению содержания кальция в металле на 26 %, уменьшению загрязненности стали оксидными включениями в 1,3 раза, глобулярными — в 1,9 раза, в сравнении с показателями металла, полученного по действующей технологии.

3. Показано, что использование ферросиликомарганца MnС25 для раскисления и легирования стали ШХ15СГ-В повысило выход годного с первого контроля для I группы ГОСТ 801–78 до 89 против 64 % по действующей технологии.

1. Сравнительные опытно-промышленные исследования влияния 65%-го ферросилиция с различным содержанием кальция на загрязненность стали ШХ15СГ-В глобулярными алюмокальциевыми включениями / А. И. Панченко, А. С. Сальников, И. Н. Логозинский и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 49–55.
2. Спектор А. Г., Зельбет Б. М., Киселева С. А. Структура и свойства подшипниковой стали. — М.: Металлургия. — 1980. — 264 с.
3. Неметаллические включения и долговечность подшипников из стали ШХ15 различных способов производства / Л. К. Оржицкая, Я. И. Спектор, Е. А. Шугульная и др. // Электрометаллургия. — 2005. — № 11. — С. 5–10.

4. Фолькмут Дж., Вильке Ф. Подшипниковые стали — новые разработки и техника испытаний для обеспечения длительного срока эксплуатации подшипников // Черн. металлы. — 2007. — № 1. — С. 49–54.
5. Гасик М. И. Магний в электростали и некоторые физико-химические аспекты проблемы получения металла подшипникового сортамента с программированным составом и количеством неметаллических включений // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1978. — Вып. 56. — С. 3–14.
6. Гасик М. И., Шульте Ю. А., Горобец А. П. Физико-химические закономерности процессов формирования глобулярных включений в подшипниковом металле // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1983. — № 5. — С. 10–15.
7. Горобец А. П. Исследование условий формирования неметаллических включений в целях снижения загрязненности подшипниковой стали глобулярными включениями: Дис... канд. техн. наук. — Днепропетровск: ДМетИ, 1984. — 185 с.
8. Сальников А. С., Логозинский И. Н., Гасик М. И. Сравнительные исследования влияния шамотного и высокоглиноземистого (импортного) сифонных огнеупоров на загрязненность заготовок и сортового проката стали ШХ15СГ-В неметаллическими включениями // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2007. — № 5. — С. 27–36.
9. Термодинамические предпосылки процессов формирования оксидных и глобулярных неметаллических включений при различных остаточных содержаниях кальция и алюминия / М. И. Гасик, А. И. Панченко, И. Н. Логозинский и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2008. — № 1. — С. 48–54.
10. В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, Ю. И. Уточкин и др. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов. — М.: МИСиС, 2007. — 318 с.
11. Пивоваров Ю. Н., Дашевский В. Я. Термодинамика процессов кислорода в расплавах Fe–Mn // Металлы. — 2006. — № 4. — С. 11–16.
12. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физико-химия и технология электроферросплавов. — Днепропетровск: Системные технологии, 2005. — 448 с.
13. Самарин А. М. Физико-химические основы раскисления стали. — М.: Наука, 1956. — 161 с.
14. Чуйко Н. М., Чуйко А. Н. Теория и технология электроплавки стали. — Киев; Донецк: Вища шк., 1983. — 248 с.
15. Образование фаз при раскислении стали кремнием и алюминием / Г. Г. Михайлов, Е. М. Вильгельм, Л. А. Чернова, О. К. Токовой // Металлы. — 1988. — № 4. — С. 10–16.
16. Михайлов Г. Г. Термодинамические принципы оптимизации процессов раскисления стали и модифицирования неметаллических включений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МИСиС, 1986. — 32 с.
17. Михайлов Г. Г. Влияние магния на фазовые превращения в жидкой стали // Электрометаллургия. — 2004. — № 5. — С. 11–18.
18. Жальбин В. И., Еришов Г. С. О восстановлении магния футеровки при выплавке стали, легированной алюминием // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1977. — № 12. — С. 69–71.
19. Горобец А. П. Физико-химические свойства щелочноземельных металлов и их поведение в металлургических расплавах // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1981. — Вып. 74. — С. 17–21.
20. Sakata Kimiaki. Technology of production of austenite type clean stainless steel // ISIJ Intern. — 2006. — 46, № 12. — P. 1795–1799.
21. Takata R., Yang J., Kuwabara M. Characteristics of inclusions generated during Al–Mg complex deoxidation of molten steel // Ibid. — 2007. — 47, № 10. — P. 1379–1386.
22. Исследование природы неметаллических включений подшипникового металла, обработанного магнием / М. И. Гасик, А. П. Горобец, С. Б. Вукелич, К. И. Волюшко // Металлургия и коксохимия. — Киев: Техніка, 1981. — Вып. 74. — С. 6–10.
23. Гасик М. И., Сальников А. С. Рентгеноспектральный микроанализ гетерофазных глобулярных и строчечных оксидных включений в стали ШХ15СГ-В // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2007. — № 6. — С. 31–37.

ОАО «Днепроспецсталь», Запорожье  
 Нац. металлург. акад. Украины, Днепропетровск  
 Поступила 26.03.2008