

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА И ПРОИЗВОДСТВА СОРТОПРОКАТА КРУПНЫХ ПРОФИЛЕРАЗМЕРОВ\*

В. Н. Корниевский<sup>1</sup>, А. И. Панченко<sup>1</sup>, А. С. Сальников<sup>1</sup>, С. В. Давидченко<sup>1</sup>,  
Л. М. Скрипка<sup>1</sup>, М. И. Гасик<sup>2</sup>, А. П. Горобец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь».  
69008, г. Запорожье, шоссе Южное, 81. E-mail: info@dss.com.ua

<sup>2</sup>Национальная металлургическая академия Украины.  
49000, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

Проанализировано влияние технологических параметров электроплавки, внепечной обработки и электрошлакового переплава в условиях ПАО «Днепроспецсталь» на показатели качества крупногабаритного сортопроката подшипниковой стали по содержанию и типам неметаллических включений. Показана возможность обработки металла на установке печь–ковш шлаками пониженной основности с уменьшением общего расхода шлакообразующих материалов. Изучены условия формирования оксидных включений с участием алюминия, восстановленного из флюса ЭШП (70 % CaF<sub>2</sub>–30 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Выполнен анализ фазового состава глобулярных включений в металле ЭШП действующей и опытной технологий. Подтверждено соответствие качества металла по неметаллическим включениям в крупногабаритном сортопрокате подшипникового металла ЭШП. Библиогр. 12, табл. 2, ил. 3.

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь; открытая дуговая плавка; внепечная обработка; электрошлаковый переплав; неметаллические включения

В производственной программе ПАО «Днепроспецсталь» (ПАО «ДСС») значительный сегмент занимают подшипниковые стали группы ШХ, реализуемые по технологическим схемам открытой дуговой выплавки (ОДВ) и электрошлакового переплава (ЭШП). По базовой технологии ОДВ в печи ДСП-60 выплавляется высокоуглеродистый металлополупродукт (0,75...0,80 % С) с регламентированным содержанием фосфора под высокоокисленным шлаком, который скачивают и наводят новый с последующим раскислением и легированием ферросиликомарганцем (ДСТУ 3548–97). Под частично раскисленным шлаком металлополупродукт выпускают из печи в приемный ковш с отсечкой печного шлака.

В ходе выпуска металла в ковш, футерованный тиксотропной глиноземистой огнеупорной массой (стены ковша) и периклазоуглеродистым кирпичом (шлаковый пояс), присаживают твердые шлакообразующие материалы (ТШМ): смесь известь (400 кг) + плавиковый шпат (150 кг) в соотношении 3:1. При наполнении одной трети высоты ковша металл раскисляют алюминием.

Сформировавшийся в ковше шлак из ТШМ (Ш1) и части печного шлака, попадающего (несмотря на отсечку) при выпуске металлополупродукта, имеет относительно повышенное со-

держание FeO и MgO. В ходе операций выпуска и формирования Ш1 металл в ковше раскисляют алюминием, а после окончания выпуска и выдержки металла Ш1 скачивают и наводят второй шлак (Ш2) также из ТШМ. Далее ковш транспортируется и устанавливается на стенд установки печь–ковш (УПК), где рафинируют сталь в течение 80...100 мин.

Известково-фторидкальциевый шлак Ш2 характеризуется высокой основностью, раскисленностью и десульфуризирующей способностью. В ходе обработки стали на УПК металл продувают аргоном с расходом 100...150 литров в минуту. После окончания обработки металла на УПК ковш со сталью и частично скачанным шлаком подают на вакуумирование с целью дегазации и углеродного раскисления стали.

По результатам выполненных исследований технологии ОДВ разработана технологическая инструкция ТИ 143-С-98-08 для выплавки стали ШХ15СГ-В, ШХ15В в условиях цеха № 3 ПАО «Днепроспецсталь» [1]. Разработанная и внедренная технология повышает выход годных партий заготовок и сортового проката металла ОДВ с первого сдаточного контроля по неметаллическим включениям с 63...70 до 92...98 %, а в отдельных размерных группах — до 100 %.

\*Работа выполнена под научным руководством академика НАН Украины М. И. Гасика.

Т а б л и ц а 1. Качество сортопроката ШХ15(СГ)-Ш по загрязненности неметаллическими включениями

Марка стали	Количество плавов, шт.		Количество прокатанных партий, шт.			Количество годных партий, шт./%		
	ОДВ	ЭШП	Σ	VI гр.* (≤40 мм)	VII гр. (>40 мм)	Σ	VI гр. (≤40 мм)	VII гр. (>40 мм)
ШХ15-Ш	13	31	118	51	67	104/88,1	46/90,2	58/86,6
ШХ15СГ-Ш	7	13	43	8	35	31/72,1	8/100	23/65,7

\*VI, VII — номера группы по ГОСТ 801–78 для металла ЭШП.

Важнейшим показателем качества подшипникового металла является загрязненность неметаллическими включениями, их химико-минералогическая природа, количество и размерный фактор, которые регламентируются требованиями ГОСТ 801–78 и рядом зарубежных стандартов при поставках металлопродукции на внешний рынок.

Технология ЭШП в условиях ПАО «ДСС» является составным элементом дуплекс-процесса ОДВ–ЭШП. Выплавленный металл ОДВ разливали сифонным способом в слитки массой 4,8 т. Прокаткой слитка производили электроды для ЭШП, которые после удаления окалины переплавляли в кристаллизаторах сечением 350, 415 и 560 мм. Переплав осуществляли под флюсом АНФ-6 (70 % CaF<sub>2</sub>–30 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) со скоростью 6,0...6,8 кг/мин.

Анализ данных статистической обработки результатов сдаточного контроля качества шарикоподшипниковой стали, произведенной в 2014 г., показал, что выход годных партий металлопродукции с первого сдаточного контроля для VI группы ГОСТ 801–78 составил 90 и 100 % для ШХ15-Ш и ШХ15СГ-Ш соответственно, а в крупных профилеразмерах VII группы аналогичные показатели характеризовались значениями 87 и 66 % (табл. 1).

Приведенные в табл. 1 результаты сдаточного контроля свидетельствуют о повышенной загрязненности металла в увеличенных профилях сортопроката, что связано с продлением времени затвердевания металла (изложница, кристаллизатор ЭШП) и, как следствие, развития массообменных процессов с участием растворенных в металле элементов-раскислителей, кислорода и серы.

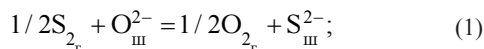
Данные сдаточного и исследовательского контроля подтверждают факт о наибольшей загрязненности глобулярными включениями стали ШХ15СГ-Ш в профилеразмерах более 100 мм. Учитывая, что данный сортопрокат получен из слитков ЭШП в кристаллизаторе сечением 560 мм с увеличенной массой металлической ванны и площадью контакта металл–флюс, повышенное содержание глобулярных включений с баллом ≥ 2 зависит от протекания реакций восстановления компонентов расплава АНФ-6 углеродом и последующим формированием оксидных фаз, определяющих состав глобулярных включений.

В связи с повышенной загрязненностью проката из металла текущего производства ЭШП неметаллическими включениями, в частности глобулярными, определены технические мероприятия с целью повышения его качества:

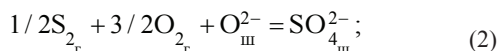
внепечная обработка подшипникового металла под шлаками пониженной основности. Снижение основности шлака обеспечивает ассимиляция шлаковым расплавом включений с фазовым составом, представленным основными оксидами (алюминаты кальция CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, шпинель MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и являющихся базовой кристалло-химической структурой глобулярных (труднодеформируемых) включений;

снижение на УПК количества оксидно-фторидного шлака, что приводит к уменьшению абсолютного содержания кальция, восстанавливаемого из шлака кремнием в ходе легирования металла на УПК, и участвующего в формировании алюминатов кальция.

Компонентами технологий ОДВ и ОДВ + ЭШП является наличие рафинирующего шлака с повышенной десульфурующей способностью. В зависимости от степени окисленности сера в шлаках может находиться в сульфидной (1) или сульфатной (2) формах [2]:



$$K_1 = \frac{\alpha_{S_{2r}^{2-}} p_{O_2}^{1/2}}{\alpha_{O_{2r}^{2-}} p_{S_2}^{1/2}};$$



$$K_2 = \frac{\alpha_{SO_4^{2-}}}{\alpha_{O_{2r}^{2-}} p_{S_2}^{1/2} p_{O_2}^{3/2}}.$$

Для указанной температуры и состава шлака равновесная концентрация серы определяется только лишь отношением  $(p_{O_2} / p_{S_2})^{1/2}$ , но не абсолютными значениями парциальных давлений кислорода и серы.

В то же время парциальное давление кислорода определяет форму присутствия серы в шлаковом расплаве: при  $p_{O_2} > 10^{-3}$  атм. сера находится в

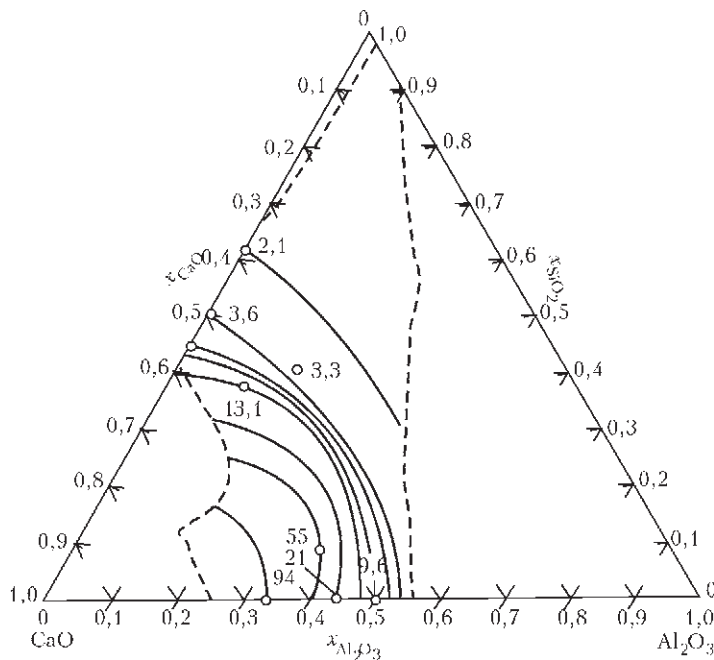


Рис. 1. Сульфидная емкость  $C_s \cdot 10^6$  шлаков CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> при 1650 °С [4]

шлаке в виде сульфидных ионов (MeS); при  $D_{I_2} \geq 10^{-3}$  атм. — в виде сульфатных ионов (SO<sub>4</sub>).

Последнее определяет механизм удаления серы посредством ее окисления в ходе ЭШП [3].

Для оценки десульфурierenden свойств шлаковых систем используется параметр сульфидная емкость ( $C_s$ ):

$$K_1 \frac{\alpha_O}{\gamma_O} = C_s = (S) \left( \frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Характеристики сульфидной емкости шлаков тернарной системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> свидетельствуют о максимальном значении параметра  $C_s$  в области составов CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, как основы шлаков для внепечной обработки, используемых в зарубежной практике (рис. 1) [4].

Вместе с тем, по данным приведенным в монографии Е. Т. Туркдогана [2], в шлаковой системе CaO–SiO<sub>2</sub> растворимость CaS при температурах 1500...1550 °С с уменьшением основности CaO/SiO<sub>2</sub> от значения 1,5 до 0,5, увеличивается от 2,5 до 5%.

Очевидно, для оптимизации составов рафинирующих смесей определяющее значение имеет не фактор основности шлака, а активность компонентов. Для CaO–CaF<sub>2</sub>, как базовой шлакообразующей системы для отечественной практики внепечной обработки, и для шлаков системы CaF<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, основы флюса АНФ-6 для ЭШП, определенный практический интерес представляют результаты вычисленных значений активностей компонентов указанной системы (рис. 2), [5].

Фторид кальция ускоряет растворение извести и повышает жидкоподвижность (снижается

вязкость) шлаков, в результате чего возрастает скорость десульфурации стали, т. е. влияние CaF<sub>2</sub> проявляется в кинетике процесса десульфурации. В некоторых ретроспективных исследованиях отмечалось, что присутствие CaF<sub>2</sub> в основных шлаках может значительно повышать его основность и таким образом увеличивать степень десульфурации стали. Авторы работ [6, 7], обосновали, что коэффициент десульфурации стали  $\Sigma(\text{CaO} + \text{MgO})$  оксидно-фторидными шлаками с повышенным CaF<sub>2</sub> не увеличивается, а снижается, что следует из приведенных данных (табл. 2).

При одинаковой жидкоподвижности шлака, характеризующейся суммой компонентов  $\Sigma(\text{CaO} + \text{MgO})$ , повышение содержания CaF<sub>2</sub> в шлаке > 4 % снижает коэффициент распределения серы на 15 %. Н. М. Чуйко и В. Б. Рутковский [6, 7] снижение десульфурierenden способности печных оксидно-фторидных шлаков объясняли повышением активности закиси железа, что следует из выражения

$$L_s = (S)/[S] = K_s a_{(\text{CaO})}/a_{(\text{FeO})},$$

где  $K_s$  — константа равновесия реакции десульфурации металла;  $a_{(\text{CaO})}$  — активность свободной концентрации оксида кальция, определяемой по методу Н. М. Чуйко.

Таблица 2. Значения коэффициента десульфурации стали шлаком в ковше $\left( L_s = \frac{(\% S)}{[\% S]} \right)$		
Содержание CaF <sub>2</sub> , %	$\Sigma(\text{CaO} + \text{MgO}) < 65 \%$	$\Sigma(\text{CaO} + \text{MgO}) > 65 \%$
< 4,0	96 (17 плавков)	67 (19 плавков)
> 4,0	81 (6 плавков)	53,3 (8 плавков)

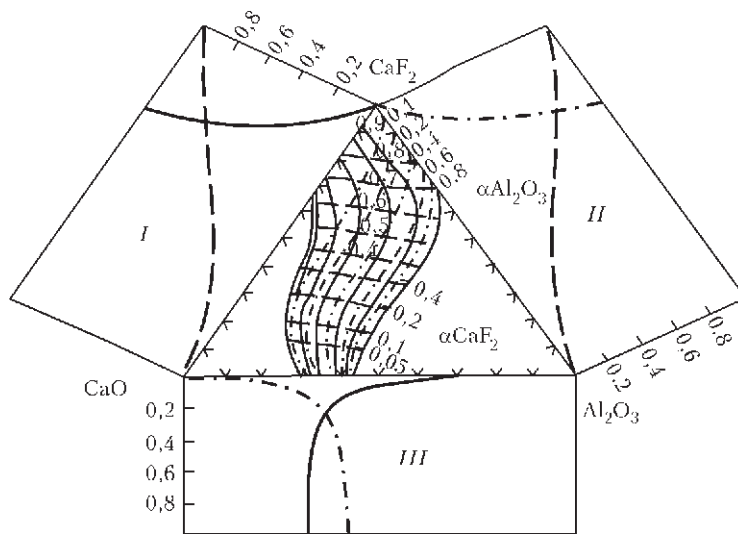


Рис. 2. Активности CaO (сплошные линии), CaF<sub>2</sub> (штриховые линии) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (штрихпунктирные линии), определенные при 1500 °С в системах: I — CaF<sub>2</sub>-CaO; II — CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; III — CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5]

Интегральная оценка эффективности протекания реакции десульфурации металла шлаковыми системами определяется достижением баланса между металлом и шлаком, активностью кислорода в металле, составом шлака и металла с учетом относительного веса шлака:

$$[S]_{\text{кон.}} = \frac{\alpha_{[O]} \left( (S)_{\text{шл.}} + \frac{[S]_{\text{нач.}}}{m} \right)}{f_s C_s + \frac{\alpha_{[O]}}{m}}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{нач., кон.}}$  — содержание серы в металле перед и после десульфурации;  $\alpha_{[O]}$  — активность кислорода в металле;  $f_s$  — коэффициент активности серы;  $C_s$  — сульфидная емкость шлака;  $m$  — относительный вес шлака (кг) на кг стали.

Уравнение (4) определяет взаимосвязь активностей кислорода и серы и характеризует процесс десульфурации как массообменную реакцию в системе металл-шлак. В то же время в процессах ЭШП около 80 % растворенной в металле серы удаляется в результате окислительной реакции в форме сульфата серы (2) [3]. При этом влияние термодинамических характеристик металлического расплава становится малозначимым и решающее значение для десульфурации металла приобретает показатель окисленности шлака  $a_{\text{FeO}}$ .

В работе [8] экспериментально установлено, что при ЭШП стали под фторидным флюсом (CaF<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и бесфторидным (CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) имеются определенные преимущества флюса CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с точки зрения обеспечения более низкого содержания кислорода в слитке по сравнению с результатами переплава на шлаках на основе CaF<sub>2</sub>. ЭШП стали под флюсом CaF<sub>2</sub>-30 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приводит к повышению концентрации FeO в шлаке в 2...2,5 раза и росту содержания кислорода в метал-

ле от 10 до 30 ppm в сравнении с ЭШП стали под флюсом 50 % CaO-50 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [9, 10].

Технологический регламент внепечной обработки стали ШХ15СГ предусматривает двухразовое формирование шлака из компонентов ТШМ. При этом решение задачи десульфурации металла шлаковыми системами обеспечивается двумя различными технологическими приемами:

при выпуске металла из печи формирующийся шлак системы CaO-CaF<sub>2</sub> плавится за счет физического тепла металла и эмульгируется в металл. Высокие значения удельной поверхности шлака по отношению к массе металла определяют диффузионный механизм переноса серы в соответствии с законом диффузии (I закон Фика):

$$I_s = \frac{D_s}{\delta} (C_s^{\text{нач.}} - C_s^{\text{кон.}}) F_{\text{уд.}} \tau, \quad (5)$$

где  $I_s$  — интенсивность массопереноса серы;  $D_s$  — коэффициент диффузии серы;  $C_s$  — градиент концентраций;  $F_{\text{уд.}}$  — удельная поверхность шлака;  $\tau$  — длительность процесса;

при наведении второго шлака на УПК десульфурация металла подчиняется законам диффузии и механизму химических реакций. При этом определяющими звеньями процесса являются сульфидная емкость шлака  $C_s$  и временной фактор  $\tau$ .

Несмотря на устранение одного из этапов десульфурации на стадии внепечной обработки при дальнейшем переплаве металла ОДВ способом ЭШП более полно реализуется механизм удаления серы за счет реакций диссоциации сульфидов, электрохимического переноса ионов серы и сульфатации растворенных сульфидов. При этом объемное содержание сульфидов снижается более чем в 4 раза [3].

Ранее было отмечено, что в крупноразмерном сортопрокате металла ЭШП имеют место случаи

выпадов глобулей, оцениваемых баллом >2,0. В составе матрицы этих включений зафиксировано преобладание корунда  $Al_2O_3$ , что свидетельствует об участии алюминия в реакциях раскисления стали и формировании указанного типа включений. Поступление алюминия в металлическую ванну определено: применением алюминия в качестве раскислителя при ОВ металла и раскислении его в ходе ЭШП; восстановлением алюминия из флюса АНФ-6 (70 %  $CaF_2$ –30 %  $Al_2O_3$ ) углеродом (1 %) марочного состава сталей ШХ15СГ:

$$(Al_2O_3)_{ж} + 3[C]_{1\%} = 2[Al]_{\%} + 3CO; \quad (6)$$

$$\Delta G_T^0 = -1728143 + 822,44 T \text{ (Дж/моль)};$$

$$K_p = \frac{\alpha_{Al}^2 P_{CO}^3}{\alpha_{Al_2O_3} \alpha_C^3} = \frac{f_{Al}^2 [Al]^2 P_{CO}^3}{\alpha_{Al_2O_3} f_C^3 [C]^3}. \quad (7)$$

Анализ термодинамических условий протекания реакции (6) выполнен с применением термодинамических данных, основанных на концепции бесконечно разбавленных растворов и с учетом практических результатов сталеплавильного производства (температурных условий, градиента концентраций растворенных элементов, фактических значений концентраций продуктов реакций).

Термодинамическая возможность протекания реакции (6) реализуется при повышенных температурах переплавного процесса и, как следствие, сопровождается повышением содержания растворенного алюминия. По результатам основополагающих исследований тепловых процессов и гидродинамики ванны ЭШП, выполненных Б. Е. Патонем, Б. И. Медоваром и др. сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ [9], определена зональность теплового поля шлаковой и металлической ванны. Установлено, что на торце электрода в зоне предплавления и формирования пленки жидкого металла, температура достигает значений 2000...2060 К. Очевидно, что это распределение температуры обуславливает возможность протекания реакции восстановления алюминия из  $Al_2O_3$ -содержащего флюса углеродом в составе сталей ШХ15СГ. В дальнейшем механизм формирования включений, содержащих  $Al_2O_3$ , может быть представлен следующим образом:

капли металла с торца электрода, обогащенные алюминием, поступают в металлическую ванну;

в ходе переплава посредством диффузии осуществляется перенос кислорода из шлакового расплава в металлическую ванну;

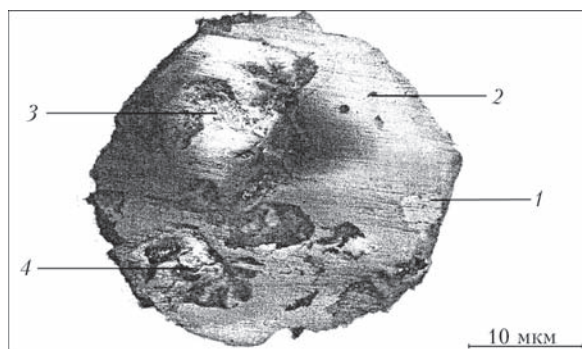
в результате взаимодействия токов электромагнитных полей, протекающих через шлак и металлическую ванну, возникающая сила Лоренца создает движение потоков шлакового и металли-

ческого расплава с показателем числа Рейнольдса  $Re \geq 1,0$  [9]. Эти физические потоки выравнивают концентрации растворенных кислорода и алюминия;

существует определенная связь между диаметром кристаллизатора и геометрическим размером металлической ванны и, как следствие, протяженностью двухфазной зоны кристаллизующегося слитка. В процессе затвердевания указанной зоны изменяется активность кислорода. Получает развитие локальная топохимическая реакция, приводящая к увеличению размеров образовавшегося оксидного включения на основе корунда. Прецизионными исследованиями [10] установлен факт образования в двухфазной области 80 отн. % включений  $Al_2O_3$ . Теплофизические процессы в ходе кристаллизации (температурный градиент и вязкость расплава, низкие значения числа Рейнольдса) определяют невозможность удаления включений из указанной зоны.

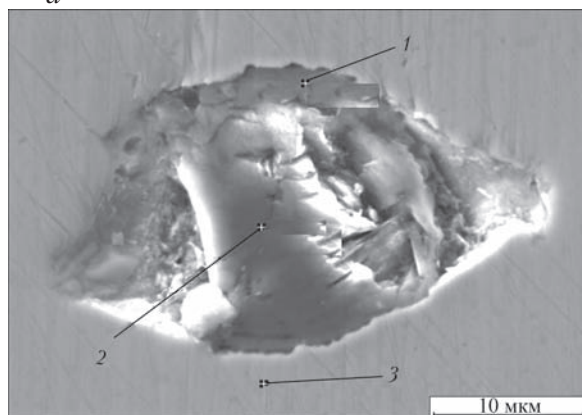
Итогом аналитического обзора научных положений теории и экспериментальных фактов зарождения и агрегации фаз продуктов раскисления является вывод, что при производстве крупных слитков ЭШП, возможным направлением снижения и ограничения содержаний включений с корундовой составляющей является применение флюсов с содержанием 5...15 %  $Al_2O_3$  (АНФ-25, АНФ-27, АНФ-29), изменение режимов раскисления по ходу переплава путем применения мелкофракционного ферросиликомарганца МнС17 при выплавке исходного металла на нижних пределах марочного содержания марганца и кремния.

По результатам мониторинга технологических показателей дуплекс-процесса ОДВ+ЭШП и на основе научного обобщения основных положений практики десульфурации и раскисления подшипниковых сталей была проведена опытно-промышленная серия из семнадцати плавок сталей ШХ15СГ ОВ с исключением первого шлака на стадии выпуска металла из печи [11]. Исходный металл переплавляли способом ЭШП (35 плавок) и назначали по заказам VI и VII групп ГОСТ 801–78. Металл ОДВ при внепечной обработке на УПК рафинировали шлаками пониженной основности ( $B = 1,6...2,2$ ) в сравнении с показателями действующей технологии ( $B = 2,5...3,5$ ) и, как следствие, он характеризовался более высоким (в 3,3...4,5 раза) содержанием серы, чем при обычной технологии, соответственно (min...max/средний) 0,009...0,020/0,015 % против 0,002...0,006/0,004 %. Содержание серы в металле ЭШП в зависимости от ее количества в расходующихся электродах изменялось в пределах 0,003...0,010/0,005 %. Степень



Фаза	Содержание элементов, мас. %				
	O	Mg	Al	Ca	Fe
1	51,02	11,21	36,81	0,96	—
2	46,40	—	28,86	24,74	—
3	46,27	10,98	31,70	—	11,28
4	51,19	14,54	34,27	—	—

а



Фаза	Содержание элементов, мас. %									
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe
1	9,64	0,22	11,43	—	24,66	—	23,80	0,27	16,19	13,79
2	43,91	0,29	45,62	0,35	0,73	0,74	6,41	—	0,40	1,55
3	—	—	—	0,63	—	—	—	1,91	1,29	96,16

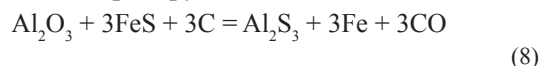
б

Рис. 3. Электронно-оптическое изображение и химический состав гетерофазного включения в металле плавки: а — ОДВ стали ШХ15СГ-Ш (№ В15155); б — ОДВ+ЭШП стали ШХ15СГ-Ш (№ 685024)

десульфурации зависит от исходного содержания серы в электроде, чем больше содержание серы, тем заметнее степень десульфурации. Установлено, что при ЭШП опытного металла содержание серы снижено приблизительно на 0,010 % при концентрации ее в исходном металле в среднем 0,015 %. Степень десульфурации при ЭШП составила около 67,6 % против 18 % на сравнительном металле, где угар серы колебался в пределах от 0 до 0,002 %.

Общее содержание кислорода в металле ЭШП находилось на уровне 15 ppm и не зависело от технологии выплавки исходного металла. Методом микрорентгеноспектрального анализа исследовали микроструктуру глобулярных включений в металле ЭШП и определили их элементный состав. Установили, что базовой матрицей гетерофазных включений является корунд  $Al_2O_3$  с оторочкой включения оксисульфидной фазой  $(Ca_x, Mn_{1-x}) S$ . Алюминаты кальция  $mCaO \cdot nAl_2O_3$ , шпинель  $MgO \cdot Al_2O_3$ , традиционно классифицируемые как глобулы, в металле опытной технологии отсутствуют. Сравнительные характеристики составов крупноразмерных включений (балл > 2,0 по ГОСТ 801–78), идентифицированных методом микрорентгеноспектрального анализа, приведены на рис. 3. Для состава оксидных включений в металле ЭШП характерно наличие сульфидной фазы

$Al_xS$  (фаза 1, рис. 3, б). Появление указанной фазы возможно в результате реакции сульфирования  $Al_2O_3$  сульфидом железа в присутствии углерода, как одной из базовых реакций в технологии производства электрокорунда [12]:



$$\Delta G_T^0 = 1132654 + 15,67T \lg T - 696,62T.$$

Очевидно, что в производственной практике классификация крупных включений в металле ЭШП как глобулей, базируется исключительно на размерном факторе, но не учитывается химико-минералогическая природа включений.

Качество подшипниковых сталей ЭШП, полученных из исходного металла СПЦ-3, выплавленного под шлаками пониженной основности, по загрязненности включениями значительно выше, чем у металла, выплавленного по действующей технологии под высокоосновными шлаками.

Результаты сдаточного контроля металла опытных плавков приведены в табл. 2.

Прогнозируемый экономический эффект разработанной технологии (без учета повышения качества стали по загрязненности неметаллическими включениями) достигается за счет снижения расхода шлакообразующих (извести и шпата) в среднем на 13 кг/т, экономии электроэнергии на УПК поряд-

Т а б л и ц а 2. Качество металла ШХ15СГ-Ш по загрязненности неметаллическими включениям

Исходный металл	Количество плавков, шт.		Количество прокатанных партий, шт.			Количество годных партий, шт./%		
	Исходные	ЭШП	Σ	VI гр.* (≤ 40 мм)	VII гр. (> 40 мм)	Σ	VI гр. (≤ 40 мм)	VII гр. (> 40 мм)
Невакумированный	5	10	36	20	16	36/100	20/100	16/100
Вакумированный	12	25	101	36	65	97/96	35/97,2	62/95,4
Всего	17	35	137	56	81	133/97,1	55/98,2	78/96,3
Металл для сравнения (I полугодие 2014 г.)	14	32	130	49	81	114/87,7	42/85,7	72/88,9

\*VI, VII — номера группы по ГОСТ 801–78 для металла ЭШП.

ка 50 кВт·ч/т и исключения затрат на вакуумирование металла порядка от 45 до 60 грн/т.

**Выводы**

1. Применительно к сквозной технологии производства сталей ШХ15СГ-Ш способом ОДВ–ЭШП проанализированы физико-химические условия формирования и удаления сульфидных и оксидных включений.

2. Обоснована возможность исключения наводки шлака системы CaO–CaF<sub>2</sub> на стадии выпуска металла из печи, что снижает вероятность появления в металле ОВ экзогенных включений шлакового происхождения.

3. Проведена опытно-промышленная кампания выплавки подшипниковых сталей с однократным формированием шлака пониженной основности на УПК и последующим переплавом металла методом ЭШП.

4. По результатам опытных плавков обеспечено повышение выхода годного в сортопрокате крупных профилазмеров с 85 до 97 % и достигнуто снижение шлакообразующих на 13 кг/т.

1. *Разработка* и промышленное освоение инновационной технологии выплавки и внепечной обработки подшипниковой электростали ШХ15СГ-В с использованием ферросиликомарганца MnC17 / А. И. Панченко, И. Н. Логозинский, А. С. Сальников [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2008. — № 5. — С. 69–73.
2. *Туркдоган Е. Т.* Физическая химия высокотемпературных процессов / Е. Т. Туркдоган. — М.: *Металлургия*, 1985. — 344 с.
3. *Медовар Б. И.* Исследование поведения неметаллических включений в расходуемых электродах большого сечения

- при ЭШП / Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко, В. А. Тихонов // *Проблемы специальной электрометаллургии: мат. сов.-америк. симп.* — К.: *Наукова думка*, 1979. — С. 24–30.
4. *Атлас шлаков: справ. изд.* — М.: *Металлургия*, 1985. — 208 с.
5. *Ждановский А. А.* Определение активностей компонентов в системе CaF<sub>2</sub>–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / А. А. Ждановский, Ю. В. Латаш, В. Н. Товмаченко // *Проблемы специальной электрометаллургии*. — 1978. — Вып. 9. — С. 114–119.
6. *Чуйко Н. М.* Новая технология выплавки шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 под белым шлаком / Н. М. Чуйко, В. Б. Рутковский // *Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия*. — 1960. — № 6. — С. 14–16.
7. *Рутковский В. Б.* О роли фтористого кальция при раскислении и десульфурации электростали / В. Б. Рутковский // *Электрометаллургия стали и ферросплавов*. — Днепропетровск: *ДМетИ*, 1963. — Вып. LI. — С. 30–40.
8. *Иноуе М.* Новейшие фундаментальные исследования процесса ЭШП в Японии / М. Иноуе // *Электрошлаковый переplав: сб. науч. тр. по материалам VI межд. конф. «Вакуумная металлургия и специальные виды плавки»*. — К.: *Наукова думка*, 1983. — Вып. 6. — С. 59–67.
9. *Исследование* магнитодинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШП / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко [и др.] // *Проблемы специальной электрометаллургии*. — 1981. — Вып. 17. — С. 54–62.
10. *Эллиот Дж.* Поведение оксидов при электрошлаковом переplаве сталей / Дж. Эллиот, Ю. Йгучи, Т. Чанг // *Проблемы специальной электрометаллургии: мат. сов.-америк. симп.* — К.: *Наукова думка*, 1979. — С. 5–24.
11. *Влияние* малофторидных и бесфторидных флюсов на загрязненность неметаллическими включениями электрошлаковой стали для подшипников / Н. Ф. Яковлев, Т. В. Ольшанская, Л. С. Рыбкина [и др.] // *Проблемы и перспективы развития спецэлектрометаллургии: отраслевой темат. сб.* — 1989. — С. 27–29.
12. *Порада А. Н.* Электротермия неорганических материалов / А. Н. Порада, М. И. Гасик. — М.: *Металлургия*, 1990. — 232 с.

The influence of technological parameters of electric melting, secondary metallurgy and electro slag remelting under conditions of PJSC «Dnepropetsstal» on the quality of large-sized rolled bearing steel as to the content and types of non-metallic inclusions was analyzed. The possibility of metal treatment in ladle furnace by slags of the reduced basicity with decrease in the total consumption of slag-forming materials was shown. The conditions of formation of oxide inclusions with aluminum recovered from the flux ESR (70 % CaF<sub>2</sub>–30 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were studied. The analysis of the phase composition of globular inclusions in the ESR metal by existing and experimental technology proved to meet the quality of the metal as to the non-metallic inclusions in the large-sized rolled bearing steel ESR metal. Ref. 12, Tables 2, Figures 3.

**Key words:** bearing steel; open-arc melting; ladle treatment; electro-slag remelting; non-metallic inclusions

Поступила 25.05.2016