УДК 669.046.558.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-7-254-46-49

*Д. В. Руцкий, А. Ю. Агарков, Н. А. Зюбан, М. С. Никитин, Р. М. Войтенко, М. М. Зимин***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ СК30
ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: tecmat@vstu.ru.

В работе приведены исследования, показывающие эффективность использования проволоки с SiCa наполнителем при внепечной обработке сталей. Эффективность модифицирования оценивали путем подсчета загрязненности неметаллическими включениями, а также определением фазового состава неметаллических включений на стадиях внепечной обработки и разливки (установка ковш-печь→вакууматор→непрерывная разливка). Исследованием установлено, что корректировка по содержанию алюминия перед разливкой приводит к образованию тугоплавких включений корунда – (Al_2O_3) ; шпинелей – $(Al_2O_3 \cdot MgO)$, которые откладываются на стенках сталеразливочного тракта и ухудшают разливаемость стали. Применение СК30_{пров} с SiCa наполнителем на окончательных этапах внепечной обработки (после введения алюминия) приводит к модификации тугоплавких включений в легкоплавкие алюминаты кальция типа $(CaO \cdot Al_2O_3)$. Наличие легкоплавких включений более предпочтительно, так как данный тип включений не откладывается на стенках разливочного стакана и не оказывает отрицательного воздействия на загрязненность включениями непрерывнолитой заготовки и изделий, получаемых из них.

Ключевые слова: неметаллические включения, силикаты, алюминаты кальция, модифицирование, внепечная обработка, непрерывная разливка.

*D. V. Rutskiy, A. Y. Agarkov, N. A. Zyuban, M. S. Nikitin, R. M. Vojtenko, M. M. Zimin***EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF USING SK30 WIRE
IN STEEL PROCESSING AT THE LADLE FURNACE PLANT****Volgograd State Technical University**

The paper presents studies showing the effectiveness of the use of wire with SiCa filler in the out-of-furnace processing of steels. The efficiency of use was evaluated by calculating the contamination with non-metallic inclusions, as well as by determining the phase composition of non-metallic inclusions at the stages of out-of-furnace processing and casting. (installation bucket furnace→vacuum cleaner→continuous casting). The study found that the adjustment of the content of aluminum before casting leads to the formation of refractory inclusions of corundum – (Al_2O_3) , spinels – $(Al_2O_3 \cdot MgO)$, which are deposited on the walls of the steel filling path and worsen the spillability of steel. The use of SK30prov with SiCa filler at the final stages of extra-furnace processing (after the introduction of aluminum), leads to the modification of refractory inclusions in low-melting calcium aluminates of the type $(CaO \cdot Al_2O_3)$. The presence of low-melting inclusions is more preferable, since this type of inclusions is not deposited on the walls of the filling cup and does not have a negative effect on the contamination of the continuously cast billet and products obtained from them with inclusions.

Keywords: non-metallic inclusions, silicates, calcium aluminates, modification, ladle furnace processing, continuous casting.

Металлургическая наследственность, проявляющаяся в развитии различных видов неоднородностей в литом и деформированном металле, является одним из основных факторов, влияющих на качество металлопродукции. Любая сталь после затвердевания содержит неметаллические включения (НМВ). При этом загрязненность неметаллическими включениями оказывает значительное отрицательное влияние на снижение показателей ударной вязкости KCV^{-50} [1, 2], на физико-химические свойства (снижение коррозионной стойкости в сероводородных и углеводородных средах) [3, 4]. Не-

металлические включения оказывают отрицательное влияние также и на технологические свойства стали, такие как пластичность в горячем состоянии, что приводит к образованию дефектов на стадии обработки давлением. Чистота стали по неметаллическим включениям является очень важным фактором, определяющим качество стали.

В настоящее время современные способы выплавки и внепечной обработки позволяют получать стали и сплавы с минимальным количеством неметаллических включений. В работах [5, 6], указано, что сталь считается чистой,

если количество неметаллических включений в ней на 1 см^2 не превышает 500 шт, а количество включений размером более 10 мкм составляет не более 10 % от общей загрязненности.

Наиболее эффективным способом снижения загрязненности включениями является модификация тугоплавких включений в более легкоплавкие соединения, которые в последующем ассимилируются шлаковой фазой при внепечной обработке стали. Это обеспечивается за счет ввода лигатуры, содержащей щелочноземельные металлы (ЩЗМ).

Наиболее распространенным ЩЗМ, используемыми для модифицирования, является Са, который в основном используют в виде лигатуры совместно с кремнием (СК30 и т. д.) [7]. Несмотря на существующие работы по использованию в качестве модификатора лигатуры, содержащей элементы (Ba, Sr, Mg, Zr и др.), об-

ладающие более высокой активностью, их применение сдерживается в связи с отсутствием достоверных данных об их поведении в металлургическом расплаве при температурах сталеплавления процессов.

Целью работы являлось определение влияния эффективности использования проволоки СК30 на фазовый состав и загрязненность стали неметаллическими включениями при внепечной обработке.

Выплавка стали 26ХМФБА осуществлялась по следующей схеме: ДСП (доведение до необходимого содержания С и Р) → обработка на установке ковш-печь (УКП) (раскисление и легирование, удаление S) → вакуумирование стали на установке ВКР (содержание водорода не более 2,0 ppm), введение $\text{Al}_{\text{пров}}$ и СК30_{пров} → непрерывная разливка (МНЛЗ). Химический состав выплавляемой стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Изменение химического состава при выплавке стали 26ХМФБА

Содержание элементов, % вес														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Sn	Ca	Al	Nb
В начале обработки на установке ковш-печь														
0,17	0,05	0,40	0,007	0,015	0,39	0,12	0,28	0,11	0,003	0,0008	0,002	-	0,019	0,0006
В конце обработки на установке ковш-печь														
0,28	0,25	0,54	0,007	0,002	0,49	0,11	0,76	0,1089	0,12	0,005	0,002	0,0021	0,0188	0,0381

Определение загрязненности и идентификация включений проводились методами оптической (Leica 8 C) и электронной микроскопии (FEI Versa 3D). Фазовый состав определялся по методике, подробно рассмотренной в работах [8, 9], пересчетом данных EDS анализа и сравнения с тройными диаграммами систем Al_2O_3 - MgO - CaO и Al_2O_3 - MnO - SiO_2 , построенными в программном комплексе Thermocalc. Анализ загрязненности неметаллическими включениями проводился автоматизированным подсчетом с помощью программного обеспечения Axalut Soft, согласно ГОСТ 1778-70, метод П (пробы, отобранные во время и внепечной обработки), метод Ш (НЛЗ).

Идентификация включений показала, что в пробах на всех этапах выплавки встречается три основных типа неметаллических включений:

- оксидные включения, в основе содержащие корунд Al_2O_3 и/или шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;
- алюминаты кальция $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ различного стехиометрического состава;

– легкоплавкие силикатные включения, содержащие оксиды, относящиеся к системе MnO - SiO_2 - Al_2O_3 ;

– сульфидные включения MnS .

Подсчет загрязненности неметаллическими включениями на различных этапах металлургического передела показал, что на начальных этапах обработки загрязненность включениями максимальная, большая часть оксидных включений представлена включениями корунда Al_2O_3 , тугоплавкими алюминатами кальция, (см. рис. 1, а).

Последующая внепечная обработка приводит к общему снижению содержания неметаллических включений; при этом доля тугоплавких включений, содержащих Al_2O_3 и $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$, во время обработки непрерывно уменьшается, что вызвано их более полной ассимиляцией шлаковой фазой при высоких температурах и одновременном перемешивании металлического расплава аргоном. После наведения высокоосновных, жидкоподвижных

шлаков загрязненность оксидными и сульфидными включениями снижается, включения ко-

рунда трансформируются в тугоплавкие алюминаты $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 1, б).

выпуск из ДСП

после десульфурации

после обработки СК30

Рис. 1. Неметаллические включения на различных этапах внепечной обработки:

1 – корунд (Al_2O_3); 2 – алюминаты кальция $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$

Силикатные включения представлены легкоплавкими включениями спессартита и анортита ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Образование легкоплавких силикатных включений более предпочтительно, так как низкие температура плавления и плотность силикатных включений, при температурах внепечной обработки (1560°C), приводят к их более полной ассимиляции шлаковой фазой во время внепечной обработки и непрерывной разливки шлакообразующей смесью промежуточного ковша и кристаллизатора. Фазовый состав силикатных включений практически не изменяется на всех этапах внепечной обработки.

Заключительная стадия внепечной обработки является наиболее важной, после нее возможность управления составом неметаллических включений становится минимальной.

В связи с этим для корректировки по содержанию алюминия и обеспечения стабильной разливки стали перед вакуумированием проводят отдачу Al, после усреднительной продувки Ar проводят присадку проволоки СК30.

Непосредственно после введения $\text{Al}_{\text{пров}}$ и СК30_{пров} в пробах преобладают тугоплавкие включения корунда или алюмомагнезильной шпинели (см. рис. 1, б). При этом включения, богатые корундом, имеют неправильную форму. Доля тугоплавких включений составляет 62 % (см. рис. 2), их температура плавления превышает температуру металлического расплава.

После вакуумирования состав алюминатных включений изменяется. Включения представляют собой сложные комплексные соединения системы Al-Mg-Ca-O (см. рис. 1, в; табл. 2).

Таблица 2

Химический состав характерных неметаллических включений

Вид включения	Точка анализа	O	Mg	Al	Si	Mn	Ca	Fe	Тип оксида
		Содержание элементов, % вес							
Рис. 1, <i>а</i>	–	41,4	16,8	39,3	–	–	0,7	ост	Шпинель MgAl ₂ O ₄
Рис. 1, <i>б</i>	Точка 1	38,4	53,9	3,05	–	–	4,6	ост	Шпинель MgAl ₂ O ₄
	Точка 2	35,5	1,6	19,5	2,4	–	40,3	ост	CaAl ₂ O ₄
Рис. 1, <i>в</i>	–	44,2	0,31	7,5	22,0	21,8	1,6	ост	Спессартит Mn ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃

После вакуумирования и введения SiCa происходит модификация включений в легкоплавкие включения типа $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 2) и последующая их ассимиляция шлаковой фа-

зой. Применяемая схема обработки с использованием в качестве модификатора СК30 приводит к неполному модифицированию тугоплавких включений, но при этом общая загрязнен-

ность не превышает 0,010 % об, из которых 68 % – включения $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $T_{\text{пл}} = 1535^\circ\text{C}$. Низкая температура плавления включений способствует их удалению из металлического рас-

плава во время непрерывной разливки за счет их ассимиляции шлаковой фазой, а также препятствует образованию отложений на внутренних стенках разливочного стакана.

Рис. 2. Загрязненность неметаллическими включениями в пробах из промежуточного ковша:
а – фазовый состав алюминатов до вакуумирования; б – фазовый состав алюминатов после обработки СК30 и вакуумирования

Выводы

После введения проволоки А1 и СК30 оксидные неметаллические включения представлены тугоплавкими включениями корунда и алюмомагнезиальной шпинели. После вакуумирования тугоплавкие включения корунда модифицируются в легкоплавкие включения алюминатов кальция типа $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. При этом доля легкоплавких включений увеличивается до 68 %.

Снижение загрязненности неметаллическими включениями после модифицирования расплава СК30 и вакуумирования обусловлено более эффективной ассимиляцией легкоплавких включений шлаковой фазой промежуточного ковша и кристаллизатора во время непрерывной разливки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неметаллические включения в низколегированной трубной стали / А. В. Дуб [и др.] // *Металлург.* – 2005. – № 4. – С. 67–73.
2. Влияние неметаллических включений на свойства труб из сталей категории прочности K48-K52 / Д. В. Руц-

кий [и др.] // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 7 (230) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – С. 13–19.

3. Влияние неметаллических включений и примесей на свойства, качественные характеристики круглого проката из специальных легированных сталей / А. И. Зайцев [и др.] // *Металлург.* – 2017. – № 8. – С. 69–74.

4. Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И. Г. Родионова [и др.] // *Сталь.* – 2017. – № 10. – С. 41–48.

5. Scamarda, A. Effect of calcium in Al-Ca-killed “clean” steel // 7 European Electric Steelmaking Conference. Milano, 2002. – Vol. 2. – P. 101–110.

6. Бигеев, А. М. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : Учебник для вузов* / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. – 3-е изд. перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544 с.

7. Вдовин, К. Н. Влияние обработки стали 25Л силикокальцием на содержание неметаллических включений и механические свойства литой заготовки / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов // *Технология металлов.* – 2012. – № 12. – С. 21–26.

8. Раскисление стали двойными и многокомпонентными сплавами щелочноземельных металлов / Б. Ф. Белов, И. В. Рябчиков, И. В. Бакин, В. Г. Мизин, А. Я. Бабанин // *Сталь.* – 2020. – № 7. – С. 14–18.

9. Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products. / A. Kazakov, P. Kovalev, S. Ryaboshuk // *CIS Iron and Steel Review.* – 2007. – № 1–2. – P. 7–13.