

УДК669.187

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-14-18

*А. В. Дроздов^{1,2}, Д. В. Руцкий¹, Н. А. Зюбан¹, М. В. Кириличев¹, М. Ю. Чубуков²***ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ НА ОБРАЗОВАНИЕ И СОСТАВ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ**¹ Волгоградский государственный технический университет² Акционерное общество «Волжский трубный завод»

email: tecmat@vstu.ru

Изучена природа образования и особенности эволюции неметаллических включений по ходу сталеплавильного передела подшипниковой стали (ШХ15). Установлено, что максимальная загрязненность соответствует началу внепечной обработки и после затвердевания (в НЛЗ). Основными типами включений, наблюдаемыми на всех этапах передела, являются алюминаты кальция ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) и магнезиальная шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Отбраковка металла происходит из-за крупных комплексных включений ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}$ и $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Ключевые слова: подшипниковая сталь, глобулярные включения, загрязненность включениями, раскисление

*A. V. Drozdov^{1,2}, D. V. Rutskii¹, N. A. Zyuban¹, M. V. Kirilichev¹, M. Yu. Chubukov²***INFLUENCE OF SECONDARY TREATMENT TECHNOLOGY
OF BEARING STEEL ON THE FORMATION AND COMPOSITION
OF NON-METALLIC INCLUSIONS**¹ Volgograd State Technical University² JSC Volzhsky Pipe Plant

The nature of the formation and features of the evolution of nonmetallic inclusions during the steelmaking conversion of bearing steel (ШХ15) has been studied. It was found that the maximum contamination corresponds to the beginning of secondary treatment and after solidification (in CCB). The main types of inclusions observed at all stages of the conversion are calcium aluminates ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) and magnesia spinel ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Metal rejection occurs due to large complex inclusions ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}$ and $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Critical parameters have been determined and technological recommendations have been developed to reduce contamination with large globular inclusions.

Keywords: bearing steel, globular inclusions, inclusion contamination, deoxidation

Введение

В период активного развития технологий, где индустриальный рост играет решающую роль в экономическом прогрессе, первостепенное значение приобретает применение высококачественных материалов. Особое внимание уделяется подшипниковым сталям, которые занимают важное место в различных секторах промышленности благодаря своим уникальным свойствам.

Залогом стабильного ресурса работы подшипников качения является обеспечение высокой чистоты стали по неметаллическим включениям (НВ). Такие требования обусловлены негативным воздействием НВ на контактную усталостную долговечность подшипников.

Формирование неметаллических включений в подшипниковых сталях является сложным процессом и происходит по разным механизмам в зависимости от их типа и состава. При этом

образование и, наиболее значимая трансформация включений происходит на этапе выпуска стали из сталеплавильного агрегата и обработки ее синтетическим шлаком [1–3].

Многочисленные исследования показывают, что оксиды являются основными НМВ подшипниковой стали [4–6], их количество выражается через общее содержание кислорода. Так по данным [7], образцы с оксидными включениями менее 10 мкм имеют усталостную долговечность, на порядок большую, чем образцы с оксидами крупнее 20 мкм.

В настоящее время большинство специальных сталей раскисляют алюминием [8]. При добавлении алюминия основным продуктом раскисления является Al_2O_3 и его производные, в том числе и с высокой температурой плавления, в состав которых входит MgO [9]. Результаты японских коллег [10] показывают, что углерод в подшипниковой стали служит раскислителем.

На практике для получения низкого содержания оксидных НВ принимают меры по минимальной окисленности металла перед первичным раскислением, максимальным удалением продуктов раскисления стали до ее затвердевания.

Целью настоящей работы является исследование химического состава и выяснения природы НВ, образующихся в стали ШХ15 дуговой выплавки, обработанной основным шлаком для подбора рационального режима раскисления.

Материалы и методы исследования

Для выявления факторов, оказывающих влияние на загрязненность подшипниковой стали ШХ15, неметаллическими включениями был выполнен анализ производственных данных и отобраны пробы от всех основных стадий обработки стали: после первичного раскисления на агрегате ковш-печь (АКП-1), по окончании десульфурации и раскисления-легирования (АКП-2), после вакуумирования (ВД), и от НЛЗ.

С целью исследования эволюции фазового состава неметаллических включений, встречающихся в отобранных пробах, использовали растровую электронную микроскопию.

Качественную оценку неметаллических включений проводили на растровом электронном микроскопе (FEI Versa 3D), оснащенный энергодисперсионным спектрометром APOLLO X (Almetek Inc). Количественный анализ загрязненности НВ проводили автоматизированным методом с помощью анализатора частиц EDAX Practical/Phase Analysis Software.

Обсуждение полученных результатов

В ходе проведения работы были проанализированы пробы металла, отобранные по всей технологической цепочке производства подшипниковой стали ШХ-15.

На рис. 1 показаны результаты общей загрязненности (правая вертикальная ось) и содержание различных типов оксидных НВ (левая вертикальная ось).

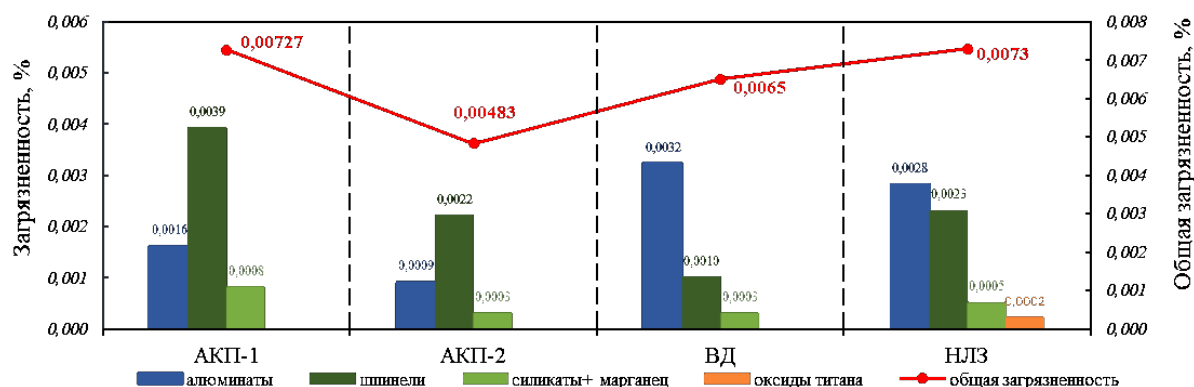


Рис. 1. Изменение объемной доли и типов неметаллических включений в металле по ходу внепечной обработки и после затвердевания

В начале внепечной обработки, после первичного раскисления алюминием и кремнием, загрязненность максимальная, в большей степени преобладают твердые включения алюмагнезиальной шпинели. По мере дальнейшей обработки (на АКП-2) происходит снижение всех типов включений. При этом для данного этапа обработки характерна минимальная загрязненность.

На технологическом этапе вакуумирования (ВД) загрязненность повышается, причем твердые шпинельные включения практически отсутствуют, преобладают алюминаты кальция. Последующий незначительный рост загрязненности непрерывнолитой заготовки вызван образованием твердых включений, что вероятно

связано с переходом их из футеровки промежуточного ковша. При этом загрязненность алюминатными включениями практически не изменяется (относительно этапа вакуумирования).

Размеры оксидных включений в среднем не превышают 8 мкм (рис. 2, а), однако на каждом технологическом этапе присутствуют единичные глобулярные включения (рис. 2, б, в) размером до 45 мкм, которые в последующем наследуются непрерывнолитой заготовкой и приводят к отбраковке металла.

Микрорентгеноспектральный анализ крупных глобулярных включений показал, что цементирующей связкой части включений является $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}$ (рис. 2, б). Кристаллически-

ми фазами, сцементированными в глобулярных включениях, является $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2, в). При кристаллизации металла на включениях, содержащих MgO , образуется сульфидная обо-

лочка из CaS . Источником их образования служит шлаковая фаза (покровный шлак) и футеровка сталеразливочного (основа MgO) и промежуточного (основа MgO) ковша.

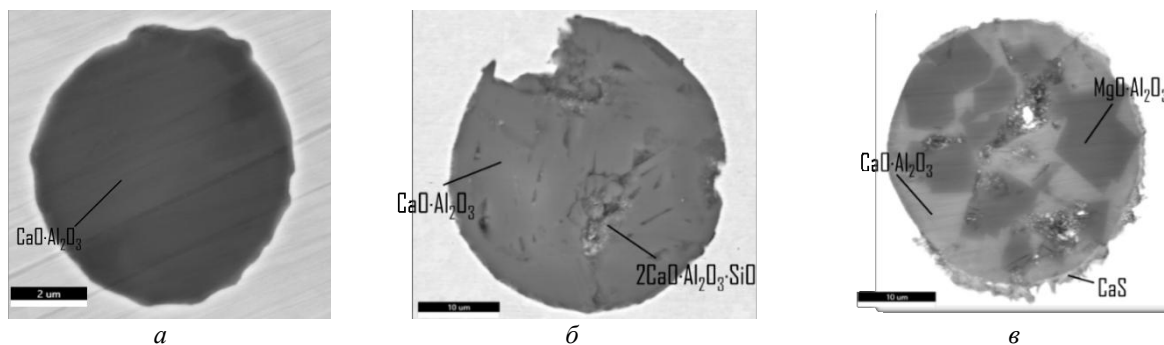


Рис. 2 Характерные включения:
а – включение $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ из АКП-1; б – многофазное включение $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ из АКП-2;
в – многофазное включение $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ в оболочке CaS из НЛЗ

Таким образом, состав и форма крупных включений указывает на их экзогенно-эндогенную природу происхождения. Их образование имеет следующий ход: запутывание включений шлака; кислород переходит через границу шлак-металл и растворяется в металле; образование включений вследствие встречной диффузии алюминия, кремния при достижении степени пересыщения. При понижении температуры внутри капель шлака образуются фазы вначале более тугоплавкие (магнезиальная шпинель),

а затем менее тугоплавкие (алюминаты кальция).

Для минимизации образования первичных включений важно иметь низкую окисленность перед началом выпечной обработки. С этой целью был проведен анализ влияние содержания углерода в конце окислительного периода в ДСП и температуры металла на выпуске на окисленность металла (рис. 3, 4).

Из рис. 3, 4 видно, что активность кислорода снижается при увеличении содержания углерода и снижении температуры расплава.

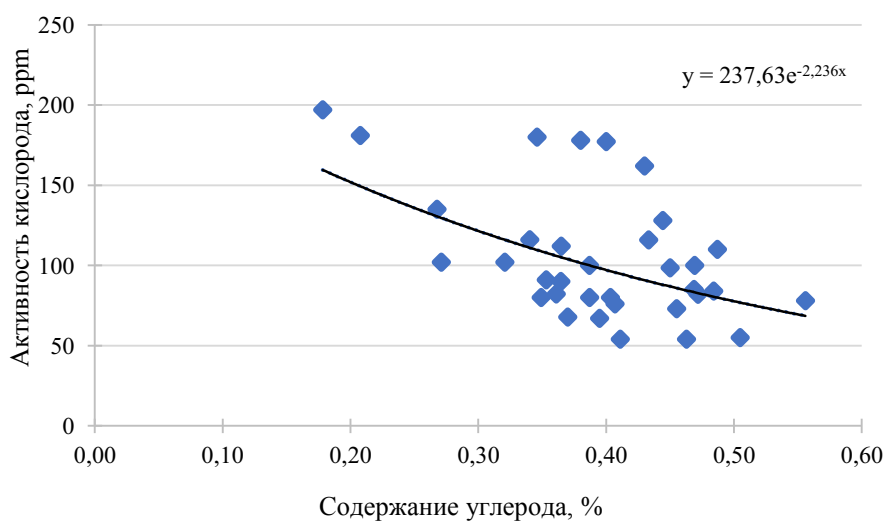


Рис. 3. Влияние содержания углерода в ДСП на активность кислорода

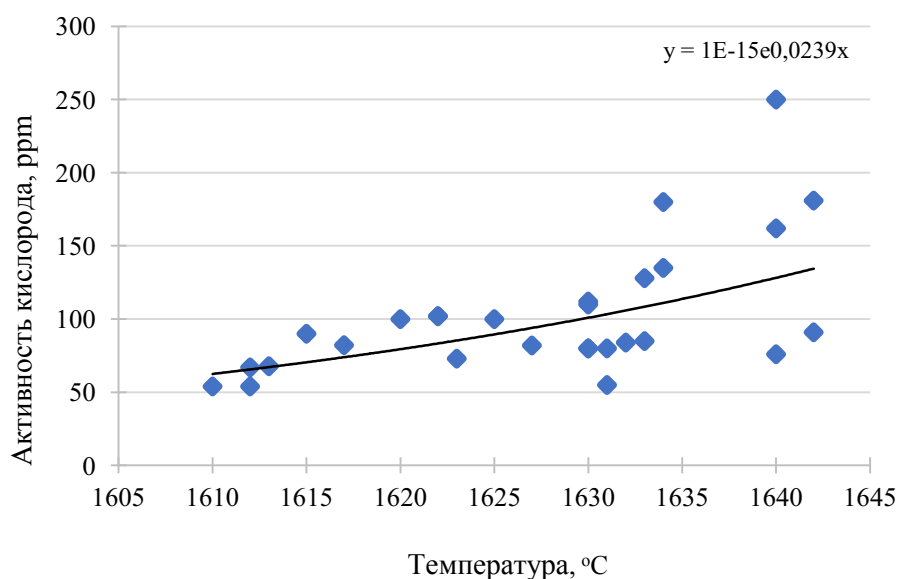


Рис. 4. Влияние температуры расплава на выпуск на активность кислорода

Из-за того, что во всех обнаруженных крупных глобулярных включениях присутствует алюминий был проведен анализ статистических данных по баллу глобулярных включений от содержания алюминия (рис. 5).

При анализе статистических данных было определено оптимальное содержание алюминия, которое находится в пределах 0,010–

0,020 %. При таком содержании обеспечивается балл глобулей от 1,0 до 2,0. Очевидно, что содержание алюминия менее 0,010 % является недостаточным для первичного раскисления и как следствие происходит увеличение размера включений.

Содержание более 0,020 % приводит к переокисленности.

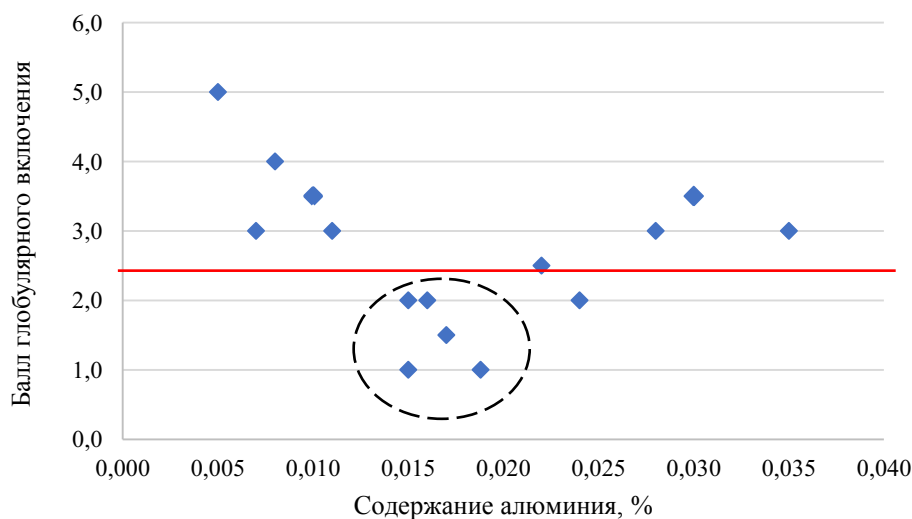


Рис. 5. Статистические данные по влиянию содержания алюминия на балл глобулярных включений

Таким образом, на основе полученных данных по составу включений и анализа производственных данных, для уменьшения загрязненности НВ стали ШХ15 выдвинуты следующие рекомендации по оптимизации технологии сталеплавильного производства:

- стремиться к получению содержания углерода в стали ближе к верхнему пределу в процессе ее выпуска из ДСП, что обеспечит наименьшую окисленность;
- поддерживать содержание алюминия на уровне 0,010–0,020 %.

Также необходимо применение раскислителей шлака на этапе внепечной обработки стали (на АКП-1, АКП-2, ВД) для повышения его асимилирующей способности и увеличение длительности мягкой продувки расплава аргоном после вакуумирования для максимально возможного всплывания имеющихся крупных неметаллических включений.

Выводы

1. Исследована морфология и эволюция неметаллических включений, образующихся в процессе внепечной обработки и в непрерывнолитой заготовке подшипниковой стали.

2. Крупные глобулярные включения появляются уже на первом этапе внепечной обработки (АКП-1) при обработке металла основным шлаком и раскислителями. Наличие в части крупных глобулярных включений выделений алюмагнезиальной шпинели на стадии обработки в агрегате ковш-печь и в НЛЗ позволяет говорить о этих включениях как частицах запутавшегося шлака и футеровки, как сталеразливочного, так промежуточного ковша.

3. Полученные данные могут быть рекомендованы для совершенствования технологии раскисления и внепечной обработки на сталеплавильном переделе при получении стали ШХ15.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пугачева, Т. М. Анализ качества стали ШХ15 разных производителей / Т. М. Пугачева, А. А. Волкова // Современные материалы, техника и технологии. – 2020. – № 3 (30). – С. 38–41.
2. Пугачева, Т. М. Исследование металлургического качества подшипниковой стали ШХ15 разных методов выплавки / Т. М. Пугачева // Современные материалы, техника и технология. – 2019. – С. 14–148.
3. Азимова, Л. Г. Сравнительные характеристики подшипниковой стали, полученной в электропечи и методом электрошлакового переплава металлизированных окатышей / Л. Г. Азимова // Научное обозрение. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 5–11; URL: <https://scienceengineering.ru/ru/article/view?id=1451> (дата обращения: 12.12.2024).
4. Исследование химического состава и природы неметаллических включений, образующихся в шарикоподшипниковой стали / М. С. Никитин, А. В. Дроздов // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября – 6 ноября 2023 г.): сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолГТУ [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 100–101.
5. Yingtie X., Guangwei Y., Zhaoping C. Inclusions Behavior Study and Its Control of Bearing Steel through LF-VD-CC Processes// Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co. 2018 Vol. 580-586.
6. WANG Xinhua. Technologies of Deoxidation, Refining and Non-Metallic Inclusion Control for Special Steels [C] / National Conference of Steelmaking and Continuous Casting Technology. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2010: 11 (in Chinese).
7. Куклев, А. В. Практика непрерывной разливки стали / А. В. Куклев, А. В. Лейтс. – М.: Металлургиздат, 2011. – 432 с.
8. Виноградов, С. В. Эффективность различных способов раскисления стали при внепечной обработке / С. В. Виноградов, В. В. Кромм, В. И. Жучков // Электрометаллургия. – 2004. – № 6. – С. 21–23.
9. Yingtie X., Guangwei Y., Zhaoping C. Inclusions Behavior Study and Its Control of Bearing Steel through LF-VD-CC Processes// Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co. 2018 Vol. 580-586.
10. Lei Cao., Li-guang Zhu., Zhi-hong Guo. Research status of inclusions in bearing steel and discussion on non-alloy deoxidation process// Journal of Iron and Steel Research International. 2022 Vol. 30(3) DOI:10.1007/s42243-022-00849-6.