

УДК 669.15-194.063.8.084.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-82-86

В. В. Галаган¹, М. В. Кириличев¹, Д. В. Руцкий¹, Н. А. Зюбан¹, Е. В. Прусова¹, К. Е. Титов²**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ ИЗ СТАЛИ 26ХГМФ***¹ Волгоградский государственный технический университет² АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»

e-mail: galaghan@list.ru

В статье приведены данные по идентификации включений в образцах металла непрерывнолитых заготовок. Подсчет и идентификацию включений проводили с использованием автоматического анализатора частиц EDAX Particle/Phase Analysis Software. Исследованием установлен преобладающий тип неметаллических включений. Показано, что большинство включений являются эндогенными и имеют сталеплавильную природу происхождения. Показано, что по сечению литой заготовки включения распределяются неравномерно, максимальную загрязненность имеют осевые объемы заготовки. При этом распределение оксидных и оксисульфидных включений противоположное, что связано с протеканием ликвационных процессов при затвердевании.

Ключевые слова: неметаллические включения, непрерывнолитая заготовка, автоматический анализ частиц

V. V. Galagan¹, M. V. Kirilichev¹, D. V. Rutskiy¹, N. A. Zyuban¹, E. V. Prusova¹, K. E. Titov²**IDENTIFICATION AND DETECTION OF THE NATURE
OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN CONTINUOUSLY
CAST BILLETS FROM STEEL 26KhGMF**¹ Volgograd State Technical University² JSC "FNPTs" "Titan-Barricades"

The article presents data on the identification of inclusions in metal samples of continuously cast blanks. The counting and identification of inclusions was carried out using the automatic particle analyzer EDAX Particle/Phase Analysis Software. The study established the predominant type of non-metallic inclusions. It is shown that a large proportion of inclusions are endogenous and have a steelmaking nature of origin. It is shown that inclusions are unevenly distributed over the section of the cast workpiece, and the axial volumes of the workpiece have the maximum contamination. At the same time, the distribution of oxide and oxysulfide inclusions is opposite, which is associated with the course of liquation processes during solidification.

Keywords: non-metallic inclusions, continuously cast billet, automatic particle analysis

В настоящее время сталь является одним из наиболее востребованных конструкционных материалов, используемых в различных отраслях промышленности. Она обладает высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и другими важными свойствами, что делает ее незаменимой для производства различных изделий. Качество стали определяется в первую очередь металлургической наследственностью, к которой можно отнести наличие продуктов выплавки в виде эндогенных неметаллических включений (НМВ). Наличие неметаллических включений различного состава, может приводить к значительному ухудшению свойств металлопродукции, такие как прочность, пластичность, коррозионная стойкость и т. д. [1–4].

Идентификация и определение количества и особенностей распределения неметаллических включений по сечению непрерывнолитой заго-

товки, является важной задачей для обеспечения качества стали и повышения ее эксплуатационных характеристик.

В настоящее время разработано достаточно много способов позволяющих обеспечить низкую загрязненность стали включениями на стадии выплавки и внепечной обработки [5–8]. Однако положительный эффект, достигнутый на стадии выплавки, может быть полностью утрачен в процессе разлива и затвердевания слитков и непрерывнолитых заготовок [5; 9; 10].

Таким образом, идентификация типа неметаллических включений, выявление особенностей их распределения по сечению непрерывнолитой заготовки является важным этапом контроля качества стали, который позволяет обеспечить улучшение ее качества и повысить эксплуатационные характеристики.

Целью данной статьи является идентифика-

ция неметаллических включений и выявление особенностей их распределения в непрерывно литой заготовке круглого сечения диаметром 260 мм из стали 26ХГМФ.

Идентификация и особенности распределения НМВ проводилось на 5 образцах, отобранных по сечению НЛЗ с шагом 24 мм (рис. 1).

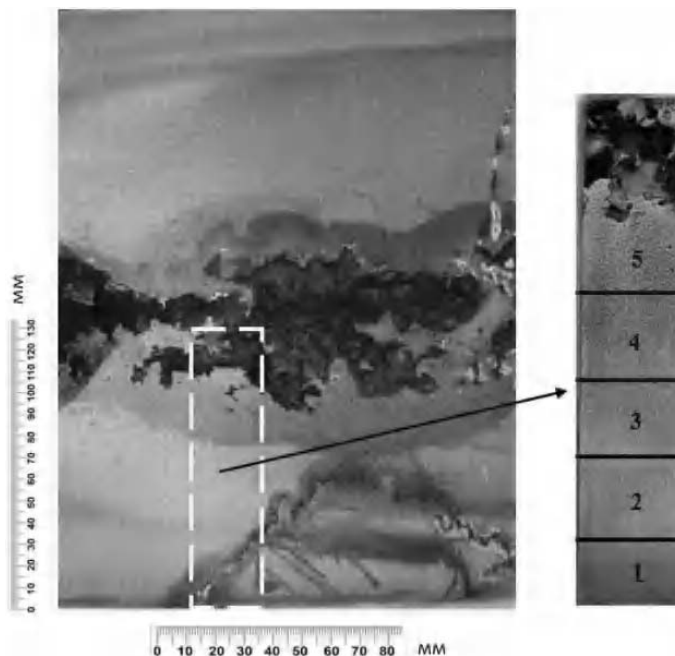


Рис. 1. Схема отбора проб для определения особенностей распределения и идентификации НМВ

Идентификация НМВ, проводилась путем совмещения сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии или (EDS), с помощью автоматического анализа частиц (EDAX Psticle/Pghase Analysis Software).

Сканированию подвергались все исследуемые образцы по сечению НЛЗ (рис. 1), параметры сканирования приведены в таблице.

После сканирования полученный массив данных химического состава неметаллических включений разбивался по группам в зависимости от их химического состава.

Параметры сканирования

Параметр	Значение
Увеличение (крат):	1000
Напряжение, кВ	12кВ
Длительность нахождения в спектре, с	1,0
Размер анализируемых включений, мкм	5,0–60,0
Размер одного поля сканирования, мм	0,348x0,271
Количество полей зрения на одном образце, шт	890
Количество полей зрения по все плавке, шт	6230
Площадь сканирования на каждом образце, мм ²	83,02
Площадь сканирования по плавке, мм ²	580
Количество проанализированных НМВ, шт	2651
Анализируемые элементы в НМВ	C; N; O; Mg; Al; Si; S; Ca; Ti; Mn; Fe

Обработка данных химического состава проанализированных включений показала, что

включения имеют сложный химический состав, их можно разделить на следующие группы:

сложные комплексные оксидные включения, содержащие $(\text{Ca}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Mg})\text{O}$ в основе, содержащие тугоплавкую шпинель $(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ в оболочке легкоплавких алюминатов кальция типа $(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ и $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ (рис. 2), доля которых составляет 32 % (рис. 3, а);

окисульфидные включения, содержащие $(\text{Ca}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Mg})\text{O}$ в оболочке CaS (рис. 2), до-

ля которых составляет 68 % (рис. 3, б);

единичные нитридные включения MnS и CaS (рис. 2).

Максимальный размер выявленных включений составляет 17 мкм, при этом большая доля включений имеет размер не превышающий 10 мкм (рис. 3, б) доля этих включений составляет 85 %.

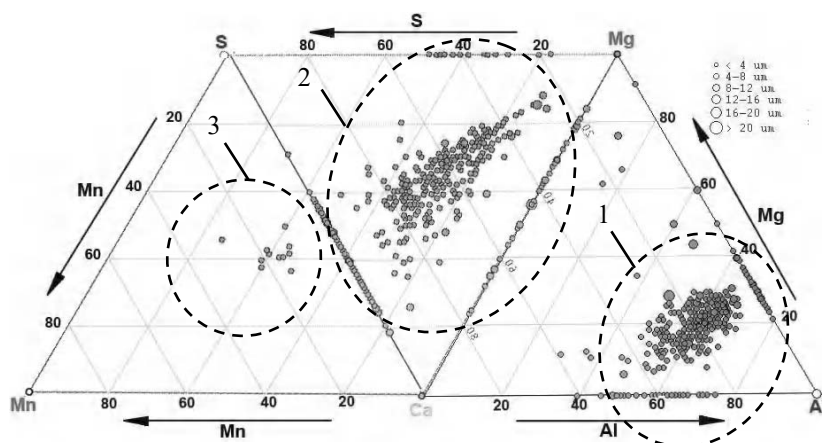


Рис. 2. Разделение на группы неметаллических включений:
1 – включения $(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ в оболочке $(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ и $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$; 2 – окисульфидные включения, содержащие $(\text{Ca}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Mg})\text{O}$ в оболочке CaS ; 3 – сульфиды MnS и CaS

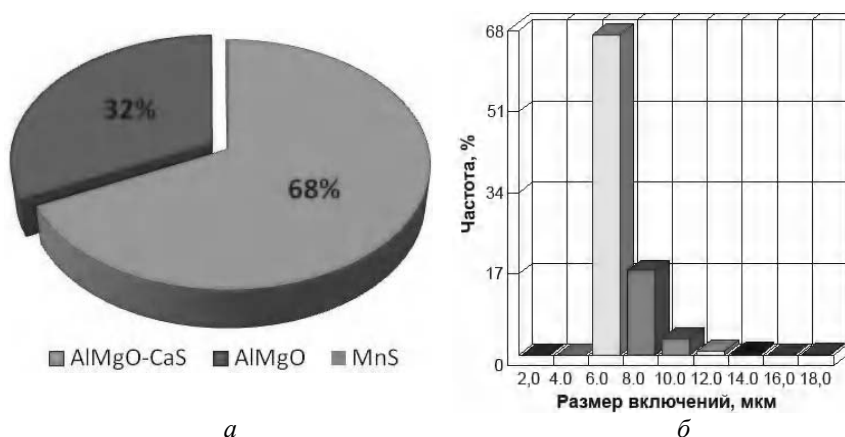


Рис. 3. Доля (а) и размер включений (б) различного типа

Химический состав, форма и размер НМВ показывает, что все типы выявленных включений можно отнести к эндогенным первичным и вторичным неметаллическим включениям сталеплавильного происхождения. Данный тип включений оказывает минимальное отрицательное воздействие на свойства стали. Используемые способы внепечной обработки,

подробно описанные в работе [5], позволяют получить сферические включения размером не более 10 мкм.

Для выявления особенностей распределения включений по сечению НЛЗ, был проведен подсчет количества различного типа включений в шт/мм² с пересчетом по ГОСТ 1778–70 (метод П) в %об (рис. 4).

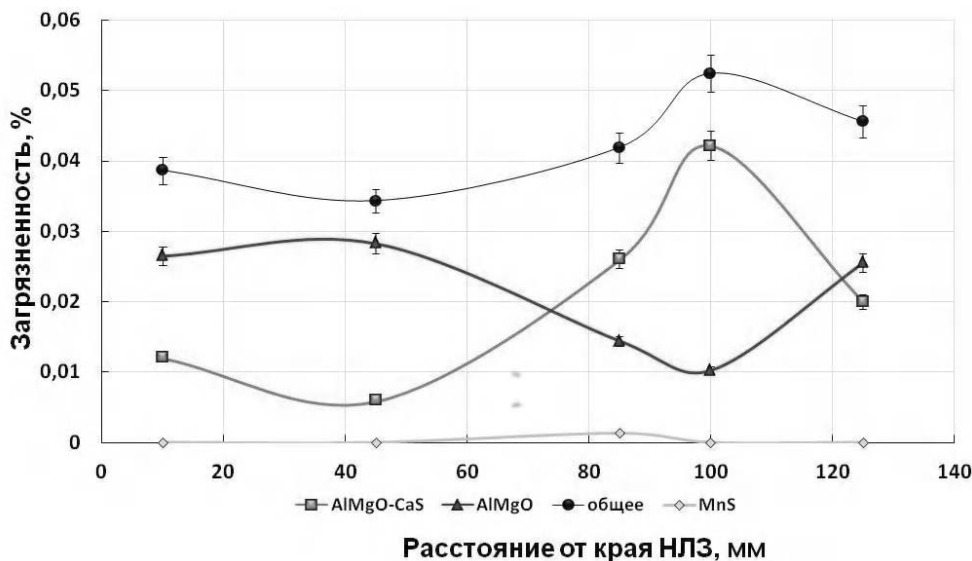


Рис. 4. Распределение включений по сечению НЛЗ

Подсчет загрязненности НМВ по сечению НЛЗ показал, что включения по сечению заготовки распределяются неравномерно (рис. 4). Общая загрязненность неметаллическими включениями постепенно увеличивается от края к центру заготовки. При этом распределение различного типа включений носит различный характер.

Загрязненность сульфидными НМВ минимальная и увеличивается до 1/2 радиуса НЛЗ. Это объясняется процессом ликвации серы при переходе из жидкого в твердое состояние и обогащению серой диффузионного пограничного слоя на фронте кристаллизации. Это обуславливает образование сульфидов, в основном MnS. Распределение оксисульфидных включений, являющихся преобладающим типом оксидов имеет противоположный по отношению к сульфидам и оксидам характер (рис. 4). Поверхностные слои имеют большую загрязненность оксисульфидными НМВ, чем сульфидными. Это объясняется тем, что при затвердевании поверхностных слоев НЛЗ на имеющихся первичных и вторичных тугоплавких оксидных включениях как на подложках образуется сульфидная фаза. В оксисульфидных НМВ, она представлена преимущественно сульфидом (Ca;Mn)S, образование которого обусловлено наличием Ca в включениях. Высокое сродство кальция к сере приводит к образованию сульфидов CaS по реакции $[Ca] + [S] \rightarrow (CaS)$, с величиной стандартной энергии Гиббса при 1600 °C (1873 K) $\Delta G^\circ = -336130$ Дж/моль, что почти в 2 раза превышает значение этой величины при образовании MnS. Это обуславливает обра-

зование тугоплавких включений (Ca,Mn)S преимущественно на эндогенных оксидах.

В процессе дальнейшего затвердевания при отсутствии включений серы, загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями уменьшается (рис. 4). При этом в осевой части НЛЗ увеличивается загрязненность оксидными неметаллическими включениями.

Относительно повышенное содержание тугоплавких оксидных включений в поверхностных слоях НЛЗ объясняется наличием первичных и вторичных НМВ, образовавшихся на стадии выплавки и разливки стали. Источником образования тугоплавких оксидных включений, кроме продуктов плавки, являются отложения на внутренней поверхности погружного разливочного стакана, а также включения, попавшие в результате колебаний зеркала металла в кристаллизаторе, и включения, образовавшиеся в промежуточном ковше при разливке стали.

В осевой части НЛЗ содержание включений увеличивается, что обусловлено протеканием ликвационных процессов и замедленным продвижением фронта кристаллизации с пограничным диффузионным слоем примесей к оси заготовки.

Видно, что условия затвердевания оказывают большое влияние на распределение включений. При достигнутой при выплавке благоприятной форме и размере включений условия затвердевания оказывают большое влияние на распределение включений и могут приводить к неравномерному распределению различного типа включений по сечению затвердевшей заготовки и как следствие к получению в готовом металле скоплений включений.

Выводы

Проведенными исследованиями установлено, что в НЛЗ из стали 26ГМФ большинство включений (68 %) представлено оксисульфидами $(Ca, Al, Mg, Si)_xO_y$. Все выявленные включения относятся к эндогенному типу и имеют сталеплавильное происхождение. Они характеризуются сферической формой и размерами, не превышающими 10 мкм.

Распределение включений различного типа по сечению заготовки неравномерное. В поверхностных слоях наблюдается максимальная загрязненность оксидными включениями. При приближении к центру заготовки по мере увеличения концентрации серы в расплаве и на существующих тугоплавких оксидах образуется сульфидная оболочка, что приводит к увеличению содержания оксисульфидных неметаллических включений. После израсходования серы из жидкого расплава в осевых объемах происходит выделение чистых оксидных неметаллических включений.

Исследованием показано, что изменяющиеся условия затвердевания оказывает значительное влияние на особенности распределения неметаллических включений по сечению литого металла слитка или непрерывнолитой заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металловедение / Гуляев А. П. – 1986. – URL: <https://djvu.online/file/Yt2CJAqoj1YHd>.
2. Влияние неметаллических включений на свойства труб из сталей категории прочности K48–K52 / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. Ю. Чубуков, Д. П. Усков, В. Ф. Петрова, М. В. Кириличев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7 (230) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Металлургия»). – С. 13–19.
3. Investigation on nonmetallic inclusions in ultra-low oxygen special steels / Li, J.Z., Jiang, M., He, X.F. et al // MMTB (2016), 47, pp 2386-2399.
4. Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, А. В. Аменжонов [и др.] // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 41–48.
5. Влияние внепечной обработки на загрязненность неметаллическими включениями в стали 26ХМФБА / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев, М. С. Никитин // Сталь. – 2021. – № 7. – С. 17–21.
6. Оптимизация состава и количества неметаллических включений в непрерывнолитой заготовке на основе раскисления расплава алюминием и карбидом кальция / Д. В. Руцкий, Г. В. Бабин, С. Б. Гаманюк, В. В. Морозов, Ю. Л. Корнев // Металлург. – 2019. – № 4. – С. 41–48.
7. Влияние обработки расплава проволокой с Са-и Ва-наполнителем на фазовый состав и загрязненность неметаллическими включениями при внепечной обработке и разливе стали 26ХМФБА / А. Ю. Агарков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, Г. В. Бабин // Черные металлы. – 2021. – № 12. – С. 36–44.
8. Григорович, К. В. Анализ процессов внепечной обработки углеродистых сталей / К. В. Григорович, А. К. Гарбер // Перспективные материалы. – 2011. – № 13. – С. 13–25.
9. Производство непрерывнолитых заготовок из стали 26ХМФБА для обсадных труб с применением барийсодержащей лигатуры / Д. В. Руцкий, В. В. Морозов, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев, М. С. Никитин, Р. М. Войтенко, В. О. Харламов // Металлург. – 2022. – № 5. – С. 45–55. – DOI: 10.52351/00260827_2022_05_45.
10. Особенности распределения неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках из серосодержащей стали С45Е / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев, М. С. Никитин, М. Ю. Чубуков // Сталь. – 2023. – № 11. – С. 8–11.