

Н. А. Зюбан, В. В. Галаган, М. В. Кириличев, Д. В. Руцкий, М. С. Гордеев

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ ИЗ СТАЛИ 26ХГМФ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tecmat@vstu.ru

В статье представлены результаты исследования особенностей распределения неметаллических включений (НМВ) в непрерывнолитых заготовках (НЛЗ), полученных с использованием и без использования электромагнитного перемешивания (ЭМП). Определение и подсчет неметаллических включений проводились с помощью автоматизированного анализатора частиц программного обеспечения EDAX Particle/Phase Analysis. В работе показано, что воздействие ЭМП не оказывает влияние на тип выявленных НМВ, так как определяющим фактором является технология выплавки и внепечной обработки, которые в данном случае были одинаковыми. ЭМП оказывает влияние на особенности распределения НМВ, изменяющиеся условия затвердевания оказывают значительное влияние на процесс затвердевания и особенности распределения включений по сечению литого металла слитка или непрерывнолитой заготовки.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, электромагнитное перемешивание, затвердевание, неметаллические включения

© Зюбан Н. А., Галаган В. В., Кириличев М. В., Руцкий Д. В., Гордеев М. С., 2025.

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта 6/643-24.

N. A. Zyuban, V. V. Galagan, M. V. Kirilichev, D. V. Rutsky, M. S. Gordeev

**THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC MIXING
ON THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS
IN A CONTINUOUSLY CAST 26KHGMF STEEL BILLET**

Volgograd State Technical University

This article presents the results of a study of the distribution features of nonmetallic inclusions (NMI) in continuously cast blanks (CCB) obtained using and without the use of electromagnetic mixing (EMF). The determination and calculation of quantitative indicators obtained using an automated analyzer characterize the program result of measuring EDAX particles/phases Analysis. The work shows that exposure to EMF does not affect the type of detected NMI, since the determining factor is the technology of smelting and furnace treatment, which in this case were the same. EMF has an effect on the distribution of NMI, changing solidification conditions have a significant effect on the solidification process and the distribution of inclusions over the cross-section of a cast metal ingot or continuously cast billet.

Keywords: continuously cast billet, electromagnetic mixing, solidification, nonmetallic inclusions

Сегодня сталь является одним из самых востребованных материалов в различных промышленных секторах благодаря своей высокой прочности, устойчивости к коррозии и другим важным характеристикам, делающим ее незаменимой в производстве множества изделий. Качество стали в значительной степени определяется ее металлургическими свойствами, включая наличие продуктов плавления в виде эндогенных неметаллических включений (НМВ), а также условиями затвердевания в процессе ее производства. Различные по составу неметаллические включения могут существенно ухудшать свойства стали, такие как прочность, пластичность и коррозионная стойкость.

Идентификация, количественный анализ и изучение распределения неметаллических включений по сечению непрерывнолитой заготовки представляют собой ключевую задачу для обеспечения высокого качества стали и улучшения ее эксплуатационных характеристик. В настоящее время существует множество методов, позволяющих снизить количество включений на этапах выплавки и внепечной обработки [1–4]. Тем не менее, достигнутые результаты могут быть полностью нивелированы в процессе разлива и условий затвердевания слитков и непрерывнолитых заготовок [1, 5, 6].

Таким образом, исследование влияния условий затвердевания на параметры литой структуры, а также анализ и выявление особенностей распределения неметаллических включений по сечению непрерывнолитой заготовки являются важными шагами в процессе контроля качества стали. Эти исследования позволяют обеспечить ее соответствие требованиям и улучшить эксплуатационные характеристики материала.

Целью данной статьи является выявление особенностей распределения НМВ в непрерыв-

но литой заготовки круглого сечения диаметром 260 мм из стали 26ХГМФ, затвердевающей в условиях электромагнитного перемешивания.

Подсчет параметров литой структуры проводился на двух предварительно подготовленных образцах из продольных темплетов осевого сечения, кристаллизовавшихся с применением электромагнитного перемешивания (ЭМП) и без него.

Идентификация НМВ, проводилась путем совмещения сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии или (EDS), с помощью автоматического анализа частиц (EDAX Pstricle/Pghase Analysis Software). Сканированию подвергались все исследуемые образцы по сечению НЛЗ. Методика сканирования и обработки данных подробно приведена в работе [7, 8].

Анализ данных о химическом составе изученных неметаллических включений показал, что их состав сложный и они могут быть классифицированы следующим образом:

Комплексные оксидные включения: основу составляют $(Ca, Al, Si, Mg)O$ содержащие тугоплавкую шпинель $(MgO \cdot Al_2O_3)$, окруженную легко плавкими алюминатами кальция, такими как $(CaO \cdot Al_2O_3)$. В образцах, подвергшихся электромагнитному перемешиванию, эти включения составляют 89 %, тогда как в образцах без такого перемешивания – 32 %.

Оксисульфидные включения: они содержат основу из $(Ca, Al, Si, Mg)O$ с оболочкой из CaS . Доля таких включений составляет 11 % в образцах с электромагнитным перемешиванием и 68 % в образцах без него (рис. 1).

Остальная доля включений, представлена комплексными оксисульфидами алюмината кальция в оболочке CaS (рис. 1). Большее количество оксисульфидных включений в НЛЗ без ЭМП, вызвано более высоким исходным со-

держанием серы в рассматриваемой плавке.

Максимальный размер выявленных включений в сравниваемых плавках образцов с ЭМП

и без достигал 14 мкм, при этом значительная часть (85 %) имеет размер, не превышающий 10 мкм (рис. 2).

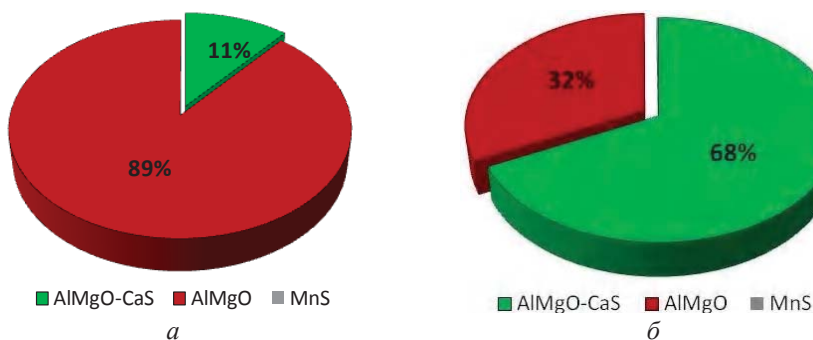


Рис. 1. Доля включений различного типа:
а – с ЭМП; б – без ЭМП

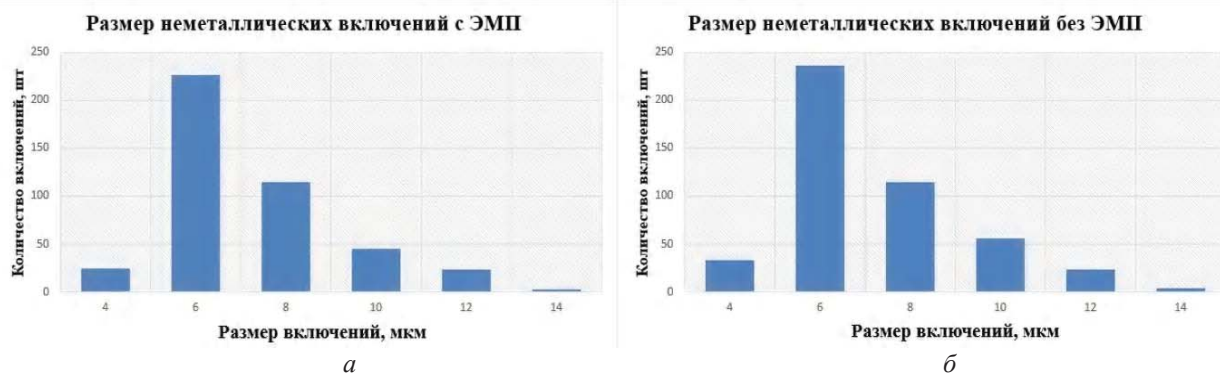


Рис. 2. Размер неметаллических включений с ЭМП (а) и без ЭМП (б)

Анализ химического состава, формы и размера неметаллических включений (НМВ) показывает, что выявленные типы включений можно отнести к эндогенным первичным и вторичным включениям, образующимся в процессе внепечной обработки. Эти включения оказывают минимальное негативное влияние на свойства стали.

Применяемые методы внепечной обработки, подробно описанные в работе [5], позволя-

ют формировать сферические включения размером не более 10 мкм (рис. 2).

Для изучения особенностей распределения включений по сечению непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) было проведено количественное определение различных типов включений в единицах на квадратный миллиметр и последующий пересчет по ГОСТ 1778–70 [7] (метод П) в процентное содержание по объему (% об.), как показано на рис. 3.

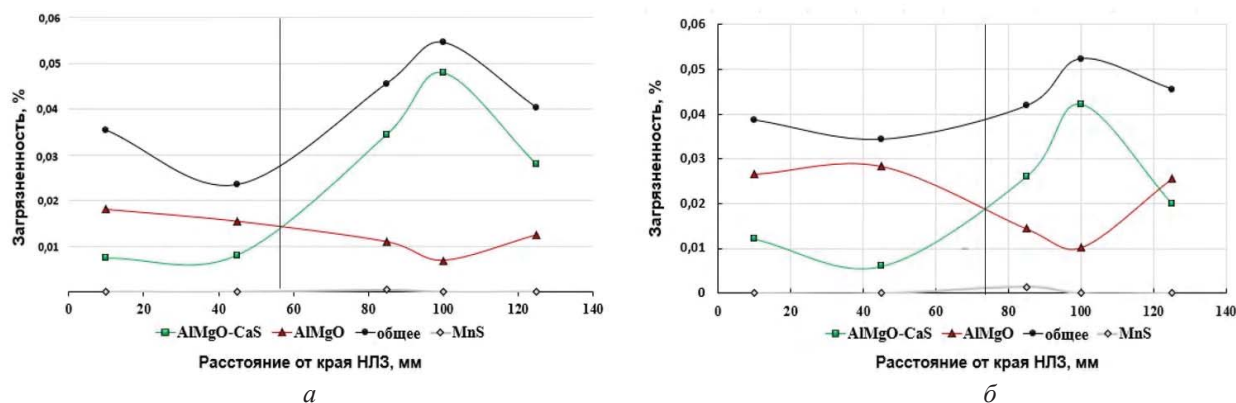


Рис. 3. Распределение неметаллических включений (а – с ЭМП; б – без ЭМП)

Анализ распределения загрязненности неметаллическими включениями (НМВ) по сечению непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) показал, что включения в обоих образцах распределены неравномерно (рис. 3). Общая загрязненность включениями постепенно увеличивается от края к центру НЛЗ. При этом различным типам включений свойственен разный характер распределения.

Концентрация сульфидных НМВ минимальна, но увеличивается до половины радиуса НЛЗ. Это связано с ликвацией серы при переходе из жидкого в твердое состояние и обогащением серой диффузионного пограничного слоя на фронте кристаллизации, что способствует образованию чистых сульфидов, преимущественно MnS . Напротив, распределение оксисульфидных включений, которые являются преобладающим типом включений, имеет противоположное изменение относительно сульфидов и оксидов (рис. 3). В поверхностных слоях больше оксисульфидных включений, чем сульфидных. Это связано с тем, что при затвердевании на тугоплавких оксидных включениях образуется сульфидная фаза, преимущественно $(Ca;Mn)S$. Кальций в составе включений способствует образованию этих сульфидов благодаря его высокому сродству к сере, что приводит к реакции $[Ca]+[S] \rightarrow (CaS)$. Стандартная энергия Гиббса для образования CaS при $1600^\circ C$ составляет $\Delta G = -336130$ Дж/моль, что почти вдвое превышает значение для образования MnS . Это способствует образованию тугоплавких включений $(Ca,Mn)S$ на оксидах.

При дальнейшем затвердевании, при отсутствии включений серы, концентрация сульфидных и оксисульфидных включений уменьшается (см. рис. 3). В центральной части непрерывнолитой заготовки увеличивается содержание и оксидных неметаллических включений.

Увеличение содержания включений в центре НЛЗ, связано с протеканием ликвационных и усадочных явлений, что при замедленном продвижении фронта затвердевания в условиях низкого температурного градиента и высокого концентрационного переохлаждения, приводит к скоплению примесей в диффузионном пограничном слое вблизи оси заготовки, затвердевающего в последнюю очередь в самых неблагоприятных условиях.

Анализ распределения неметаллических включений (НМВ) в сравниваемых НЛЗ, показывает их сходство по химическому составу, типу и механизмам образования. Однако в не-

прерывнолитой заготовке, затвердевшей с использованием электромагнитного перемешивания (ЭМП), доминирование оксисульфидных включений по сравнению с оксидными начинается значительно раньше по сечению слитка, чем в заготовке, затвердевшей без ЭМП (см. рис. 1, а и 1, б). Это указывает на меньшую протяженность зоны столбчатых кристаллов (условно обозначенную вертикальной линией) и свидетельствует об ускоренном процессе охлаждения металла, достигнутом благодаря применению ЭМП.

Выводы

В НЛЗ из стали 26ХГМФ большинство включений, представлено сложными комплексными включениями – оксисульфидами $(Ca,Al,Mg,Si)_xO_y$. Все выявленные включения относятся к эндогенным включениям сталеплавильного происхождения, которые имеют сферическую форму и размер которых не превышает 10 мкм.

Распределение различных типов включений по сечению заготовки отличается неравномерностью. В поверхностных слоях концентрация оксидных включений достигает максимума. При движении к центру заготовки, благодаря возрастанию содержания серы в расплаве, на существующих тугоплавких оксидах формируется сульфидная оболочка, что увеличивает количество оксисульфидных неметаллических включений. По мере исчерпания серы в жидком расплаве в центральных объемах выделяются чисто оксидные неметаллические включения. Исследованием показано, что изменяющиеся условия затвердевания оказывает значительное влияние на особенности распределения неметаллических включений по сечению литого металла слитка или непрерывнолитой заготовки. В непрерывнолитой заготовке, затвердевшей с электромагнитным перемешиванием (ЭМП), оксисульфидные включения начинают преобладать над оксидными значительно раньше по сечению, чем в заготовке без ЭМП. Это указывает на сокращение зоны столбчатых кристаллов и более быстрое охлаждение металла благодаря ЭМП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.

3. Влияние обработки расплава проволокой с Са и Ва-наполнителем на фазовый состав и загрязненность неметаллическими включениями при внепечной обработке и разливке стали 26ХМФБА / А. Ю. Агарков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, Г. В. Бабин // *Черные металлы.* – 2021. – № 12. – С. 36–44.

4. *Григорович, К. В.* Анализ процессов внепечной обработки углеродистых сталей / К. В. Григорович, А. К. Гарбер // *Перспективные материалы.* – 2011. – № 13. – С. 13–25.

5. 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.

6. 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.

7. ГОСТ 1778–70 (ИСО 4967–79) Металлографические методы определения неметаллических включений [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005709/>

8. Идентификация и выявление природы неметаллических включений в непрерывнолитой заготовке из стали 26ХГМФ / В. В. Галаган, М. В. Кириличев, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, Е. В. Прусова, К. Е. Титов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 6 (289) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 82–86. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-82-86.