



УДК [620.18:669.14.018]:621.77
DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-135-142



ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ Э90ХАФ

А. С. Симачев¹, Т. Н. Осколкова¹, А. А. Уманский¹,
А. В. Головатенко²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Проведены металлографические и рентгенографические исследования непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э90ХАФ. Установлены закономерности распределения неметаллических включений по зонам кристаллизации до и после деформации заготовок. Выявлено, что в корковой зоне основными неметаллическими включениями являются оксиды точечные, нитриды алюминия, силикаты железа типа (FeO·SiO₂) и алюмосиликаты (Al₂O₃·SiO₂). В зоне столбчатых кристаллов идентифицированы алюмосиликаты (Al₂O₃·SiO₂), оксиды точечные, силикаты железа (FeO·SiO₂). В центральной зоне слитка выявлены сульфиды марганца (MnS), силикаты марганца (MnO·SiO₂), алюминия (Al₂O₃·SiO₂) и железа (FeO·SiO₂), оксиды точечные. Определено, что концентрация и размеры неметаллических включений имеют тенденцию к увеличению от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок, что согласуется с общепринятыми представлениями о механизмах формирования слитков в процессе кристаллизации. Раскрыт механизм деформации двухфазных силикатных неметаллических включений и их влияния на качество рельсовой продукции. Показано, что неоднородная деформируемость сложных силикатных включений усугубляет их вредное влияние на качество рельсовой продукции. При этом появляются дополнительные напряжения к имеющимся на межфазных границах включение – матрица деформационным и контактным напряжениям. Эта закономерность имеет место и для недеформирующихся силикатных включений. Такое распределение включений в объеме заготовок несколько снижает их негативное влияние на качество рельсов, поскольку в процессе прокатки более интенсивной деформации подвергаются приконтактные слои заготовок, а по мере приближения к осевой зоне заготовок интенсивность деформации снижается.

Ключевые слова: рельсовая сталь, неметаллические включения, оксиды, силикаты, нитриды, сульфиды, легирование, микроструктура, железнодорожные рельсы

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Материаловедение».

Для цитирования: Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Уманский А.А., Головатенко А.В. Исследование неметаллических включений в различных зонах кристаллизации рельсовой стали марки Э90ХАФ // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 135–142. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-135-142>

NON-METALLIC INCLUSIONS IN DIFFERENT ZONES OF CRYSTALLIZATION OF E90KHAF RAIL STEEL

A. S. Simachev¹, T. N. Oskolkova¹, A. A. Umanskii¹,
A. V. Golovatenko²

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

Abstract. Metallographic and X-ray studies of continuously cast billets of E90KhAF rail steel have been carried out. We have established the regularities of non-metallic inclusions distribution over the crystallization zones before and after billets deformation. It was revealed that in crustal zone the main non-metallic inclusions are point oxides, aluminum nitrides, iron silicates (FeO·SiO₂) and aluminosilicates (Al₂O₃·SiO₂). They were identified in the zone of columnar crystals. In central zone of the billet, manganese sulfides (MnS), manganese silicates (MnO·SiO₂), aluminosilicates (Al₂O₃·SiO₂), iron silicates (FeO·SiO₂), and point oxides were found. It has been determined that concentration and size of nonmetallic inclusions tend to increase from the surface to central zone of continuously cast billets, which is consistent with generally accepted ideas about mechanisms of billet formation during crystallization. The mechanism of deformation of two-phase silicate non-metallic inclusions and their influence on quality of rail products was disclosed. It is shown that inhomogeneous deformability of complex silicate inclusions aggravates their harmful effect on rail products quality.

In this case, additional stresses appear in addition to inclusion-matrix deformation and contact stresses existing at interphase boundaries. This pattern also holds for non-deformed silicate inclusions. Such a distribution of inclusions in the billets volume somewhat reduces their negative effect on rails quality, since near-contact layers of the billet undergo more intense deformation during rolling, and as the axial zone of a billet is approached, deformation rate decreases.

Keywords: rail steel, non-metallic inclusions, oxides, silicates, nitrides, sulfides, alloying, microstructure, railway rails

Funding. The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Kemerovo Region, Scientific project No. 20-48-420011, using the equipment of the Facility Center “Materials Science”.

For citation: Simachev A.S., Oskolkova T.N., Umanskiy A.A., Golovatenko A.V. Non-metallic inclusions in different zones of crystallization of E90KhAF rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 135–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-135-142>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ежегодно в мире производится 10 – 12 млн т рельсовой продукции. Возрастающая интенсивность использования железных дорог приводит к необходимости создания рельсовых сталей, которые могут обеспечить повышение надежности рельсов, минимизировать количество случаев разрушения пути [1 – 4]. В частности, в отечественной металлургии в последние годы произошел переход на массовое производство рельсов из сталей, дополнительно легированных хромом [5], расширяется использование заэвтектоидных рельсовых сталей [6, 7].

Одним из важнейших показателей качества сталей ответственного назначения, к которым относятся и рельсовые стали, является минимальное количество неметаллических включений. Это подтверждается наличием в действующей нормативной документации на производство железнодорожных рельсов требований к допустимым размерам и концентрации включений определенного вида. Согласно действующего ГОСТ Р 51685 – 2013 размер наибольшего диаметра отдельных глобулярных включений не должен превышать 30 мкм при оценке по каждому образцу и 20 мкм при оценке усредненного диаметра.

Размер наибольшей длины строчечных глобулярных включений не должен превышать для рельсов специального назначения 353 мкм при оценке максимального размера по каждому образцу и 300 мкм при оценке усредненного максимального размера; для рельсов общего назначения 705 мкм при оценке максимального размера по каждому образцу и 500 мкм при оценке усредненного максимального размера. Суммарный коэффициент загрязненности рельсов строчечными глобулярными включениями и отдельными глобулярными включениями должен быть не более 30 мкм.

Неметаллические включения неизбежно присутствуют в стали независимо от ее химического состава и способа производства. При этом характер и степень влияния неметаллических включений на показатели качества стальных изделий определяется их составом, расположением, размерами и относительной концентрацией.

Состав и концентрация образующихся включений в наибольшей степени зависят от вида используемых

раскислителей и легирующих, технологических особенностей внепечной обработки и разливки стали. В рельсовой стали с целью снижения концентрации высокоглиноземистых включений в последние годы отказались от использования алюминия в качестве раскислителя и применяют ферросплавы с пониженным содержанием алюминия в виде остаточной примеси [8, 9]. В результате проведенной исследовательской работы выявлено, что увеличение продолжительности продувки инертным газом в сталеразливочном ковше приводит к уменьшению концентрации неметаллических включений [9]. В работе [10] показано влияние конструкции промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на удаление неметаллических включений в процессе непрерывной разливки стали.

Расположение включений определяется временем их образования. По времени выделения в процессе кристаллизации стали включения подразделяют на докристаллизационные, кристаллизационные и посткристаллизационные. Наиболее сильное отрицательное влияние на пластичность стали оказывают кристаллизационные оксиды, поскольку имеют свойство концентрироваться по границам зерен. Влияние докристаллизационных (образующихся в жидкой стали) включений значительно менее выражено и даже существует мнение об их практически полном удалении из стали в процессе внепечной обработки и кристаллизации.

Следует констатировать, что в настоящее время среди исследователей отсутствует единое мнение о механизмах и степени влияния неметаллических включений различного происхождения, вида и формы на характеристики рельсов [11 – 18]. В частности, в работе [15] показано, что одним из наиболее значимых факторов возникновения дефектов в виде трещин в процессе эксплуатации рельсов являются включения глинозема, нитридов и карбидов титана, а также хрупкоразрушенные оксиды сложного состава; указанные включения в зоне их локализации создают опасные поля напряжений. Авторы работы [17] утверждают, что глобулярные включения (например, пластичные силикаты) являются самым благоприятным типом неметаллических включений, а в исследовании [18] приводятся данные о том, что глобулярные включения являются причиной воз-

никновения контактно усталостных дефектов рельсов и степень их влияния сопоставима со строчечными высокоглиноземистыми включениями. При этом следует отметить, что в большинстве работ не рассматривается вопрос распределения неметаллических включений по зонам непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) и готовых рельсов, также остается неосвещенным вопрос поведения включений в процессе горячей деформации. Поэтому указанная тематика исследования является актуальной. Следует отметить, что ранее авторским коллективом проведены исследования неметаллических включений по зонам НЛЗ рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ [19, 20]. В настоящей работе представлены результаты исследований стали марки Э90ХАФ, применяемой в настоящее время для производства железнодорожных рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования распределения неметаллических включений осуществляли по ГОСТ 1778 – 70 в образцах, вырезанных из трех зон (корковой, столбчатых кристаллов, центральной) НЛЗ. Схема вырезки образцов из разных зон представлена на рис. 1. Неметаллические включения в разных зонах НЛЗ исследовали в исходном состоянии и после высокотемпературного кручения. Метод высокотемпературного кручения является максимально приближенным испытанием к процессам обработки металлов давлением. По результатам проведения таких испытаний неметаллические включения более точно идентифицируются, поскольку в местах их залегания повышается вероятность разрыва основного металла.

Экспериментальные исследования проводили с использованием установки для испытаний на высокотемпературное кручение, оптической металлографии (микроскопы OLYMPUS – GX 51F и ЛабоМет-И1), рент-

генографии (рентгеновского дифрактометра ДРОН-2,0 с железным K_{α} -излучением), растровой электронной микроскопии (микроскоп «Philips SEM 515», оснащенный микроанализатором EDAX Genesis).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографически в корковой зоне НЛЗ стали марки 90ХАФ в исходном состоянии наблюдается незначительное количество оксидов точечных и нитридов алюминия (см. таблицу). При исследовании образцов стали из этой зоны после высокотемпературного кручения металлографически и с помощью растровой электронной микроскопии дополнительно выявлено наличие силикатов железа ($FeO \cdot SiO_2$), а также включения алюмосиликатов (рис. 2, а, б), что подтверждается рентгенофазовым анализом (рис. 2, в).

При исследовании видов неметаллических включений в стали в исходном состоянии в зоне столбчатых кристаллов были идентифицированы силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные (см. таблицу). В этой же зоне после высокотемпературного кручения с помощью растровой микроскопии, металлографического и рентгенофазового исследований выявлены дополнительно алюмосиликаты и силикаты железа (рис. 3).

Исследование центральной зоны НЛЗ рельсовой стали марки Э90ХАФ до пластической деформации выявило наличие сульфидов, силикатов недеформирующихся, оксидов точечных (см. таблицу).

При исследовании центральной зоны НЛЗ рельсовой стали марки Э90ХАФ после высокотемпературного кручения рентгенографическими методами (рис. 4) и с помощью растровой электронной микроскопии выявлены сульфиды марганца (MnS), силикаты марганца, алюминия и железа (рис. 5).

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что во всех зонах присутствуют оксидные включения, при этом их относительная концентрация незначительна (см. таблицу). Оксиды относятся к наиболее распространенным в стали неметаллическим

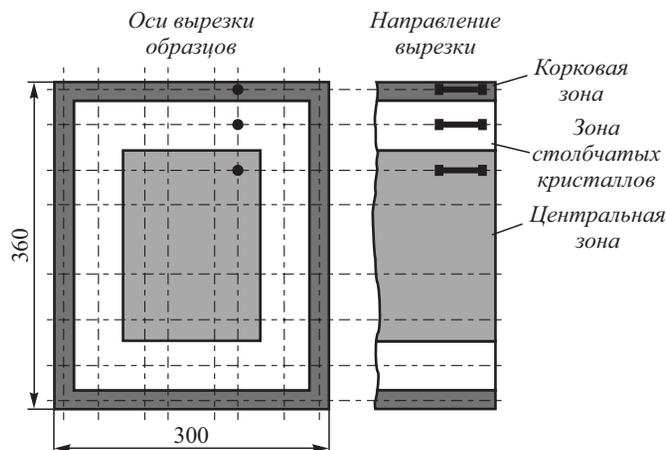


Рис. 1. Схема вырезки образцов из зон НЛЗ рельсовой стали

Fig. 1. Scheme of samples cutting out from the zones of rail steel CCB

Результаты исследований неметаллических включений по ГОСТ 1778 – 70 в разных зонах НЛЗ стали марки 90ХАФ

Results of studies of non-metallic inclusions in according to GOST 1778 – 70 in different zones of 90KhAF steel CCB

Зона НЛЗ	Вид неметаллических включений	Балл
Корковая	Оксиды точечные	1а
	Нитриды алюминия	1б
Столбчатых кристаллов	Силикаты недеформирующиеся	1а
	Оксиды точечные	2а
Центральная	Сульфиды	1а, 1б
	Силикаты недеформирующиеся	4б
	Оксиды точечные	1а

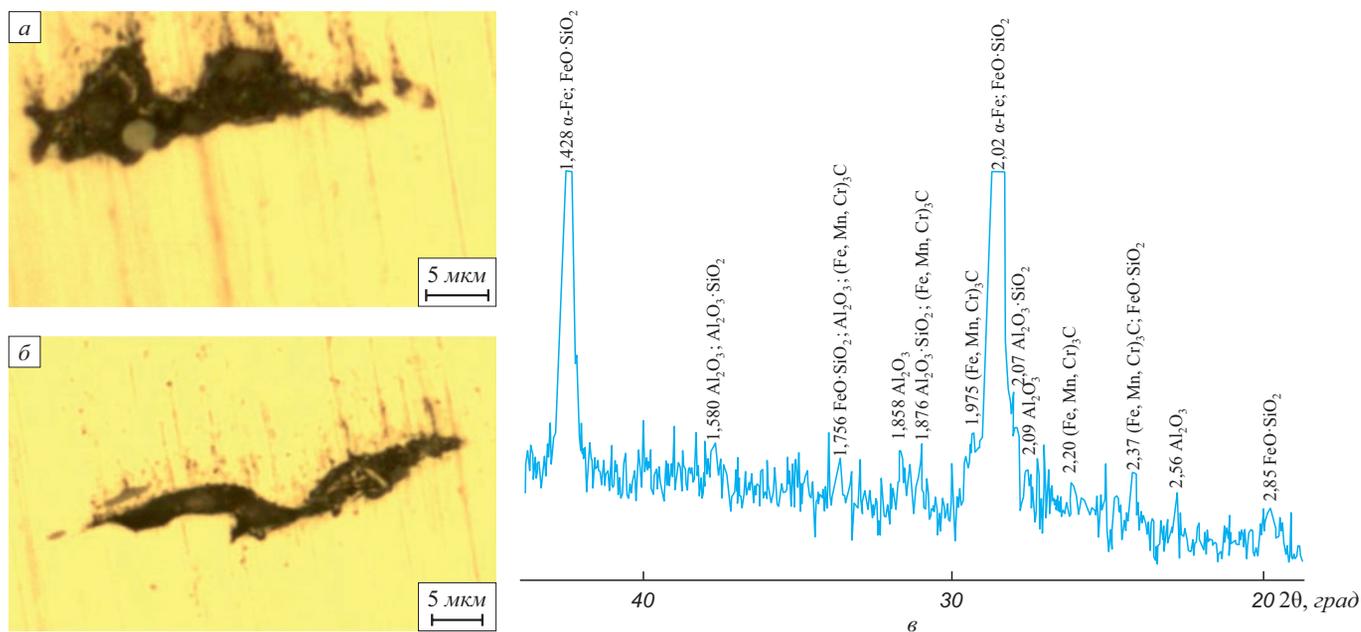


Рис. 2. Исследование неметаллических включений в корковой зоне НЛЗ стали марки Э90ХАФ: а – силикаты железа; б – алюмосиликаты; в – фрагмент дифрактограммы корковой зоны НЛЗ

Fig. 2. Study of non-metallic inclusions in the crustal zone of E90KhAF steel CCB: а – iron silicates; б – aluminosilicates; в – a fragment of diffractogram of CCB crustal zone

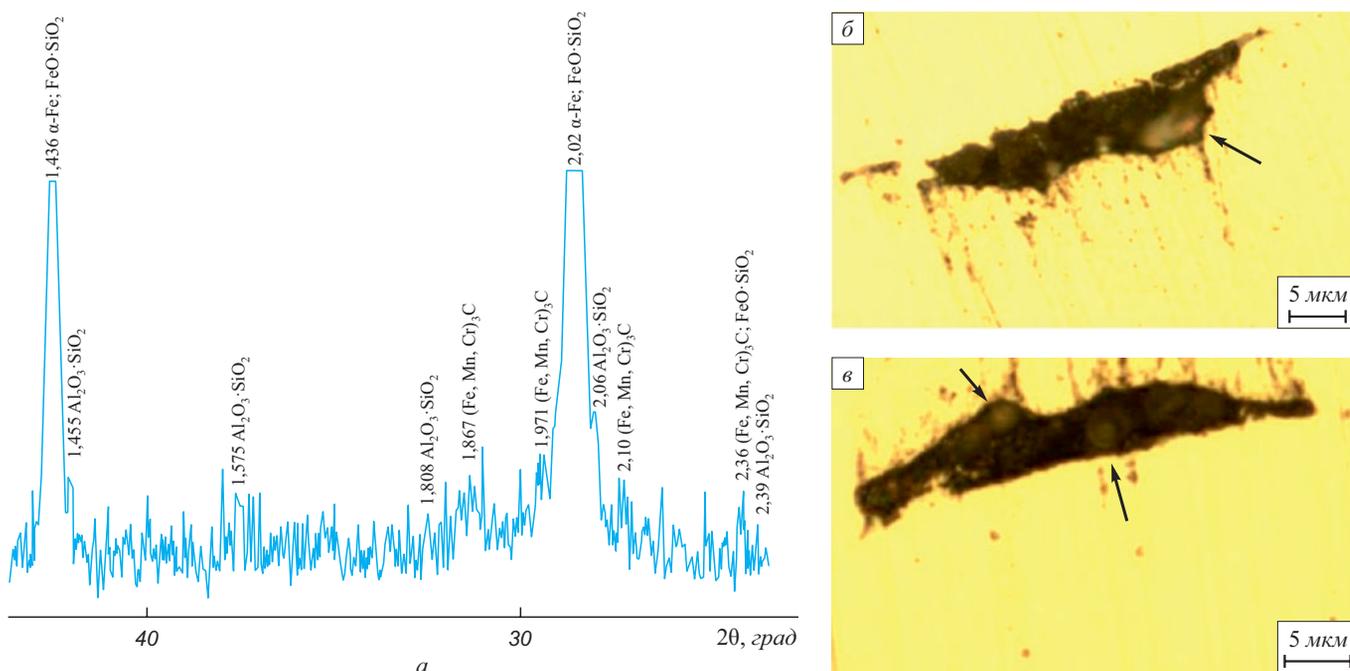


Рис. 3. Исследование неметаллических включений в зоне столбчатых кристаллов НЛЗ стали марки Э90ХАФ: а – фрагмент дифрактограммы зоны столбчатых кристаллов НЛЗ; б – алюмосиликаты; в – силикаты железа

Fig. 3. Study of non-metallic inclusions in the fringe crystals zone of E90KhAF steel CCB: а – a fragment of diffractogram of the CCB fringe crystals zone; б – aluminosilicates; в – iron silicates

ским включениям. При этом большая часть таких включений не выявляется при металлографическом исследовании из-за малых размеров (менее 2 мкм).

Выявлено, что во всех зонах НЛЗ стали Э90ХАФ присутствуют недеформирующиеся силикатные вклю-

чения в виде силикатов алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), силикатов железа ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) и марганца ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$). Указанные включения при деформации в процессе прокатки выступают в роли концентраторов напряжений и значительно увеличивают риск появления внутренних де-

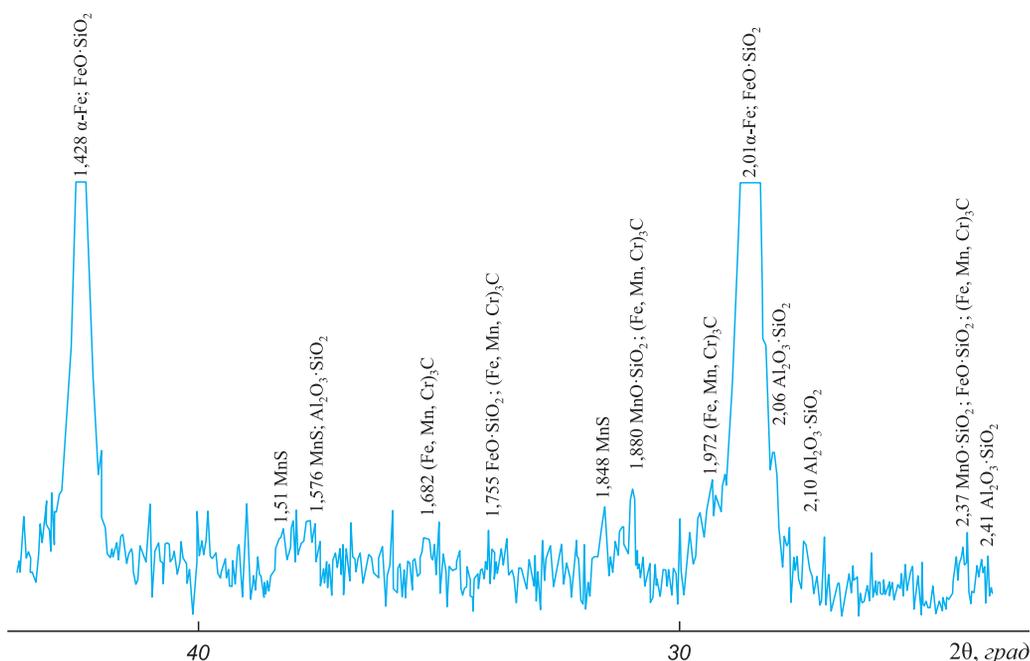


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы центральной зоны НЛЗ стали марки Э90ХАФ

Fig. 4. Fragment of diffractogram of the central zone of E90KhAF steel CCB

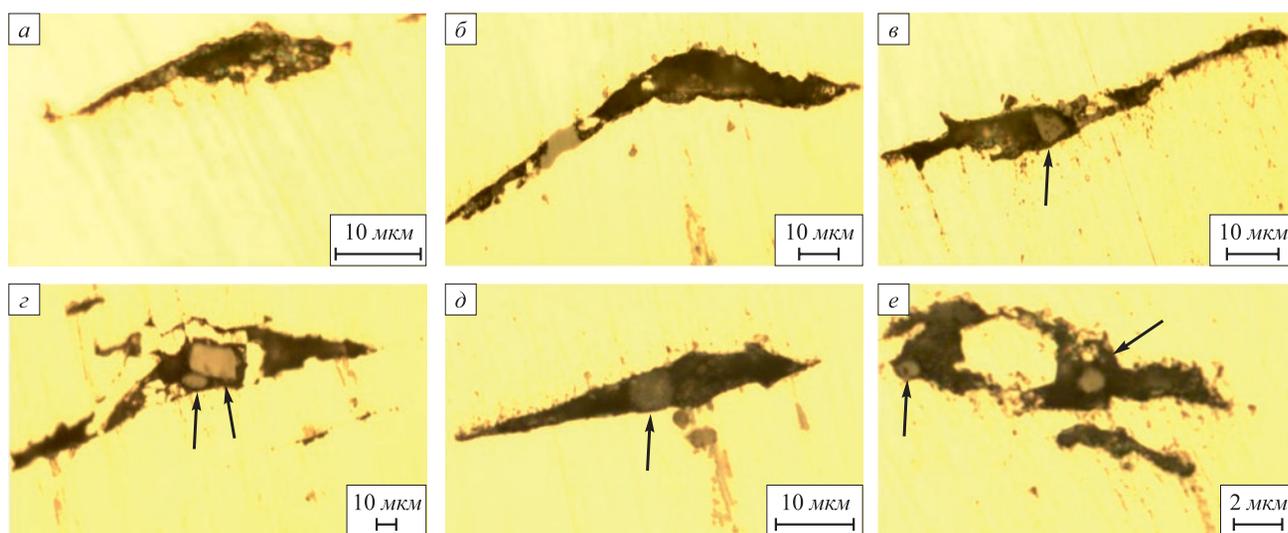


Рис. 5. Неметаллические включения в центральной зоне НЛЗ стали марки Э90ХАФ: а, б – сульфиды марганца; в, г – силикаты алюминия и марганца; д, е – силикаты железа

Fig. 5. Non-metallic inclusions in the central zone of E90KhAF steel CCB: а, б – manganese sulfides; в, г – silicates of aluminum and manganese; д, е – iron silicates

фектов в виде расслоений. Кроме того, поскольку перечисленные включения являются двухфазными (состоят из силиката и оксида или шпинели), то они проявляют неоднородную деформируемость. Силикатная фаза хорошо деформируется, вытягиваясь в направлении деформации (рис. 2, а, б), а корунд или шпинель находятся в силикатной матрице и не деформируются. Неоднородная деформируемость таких неметаллических включений усугубляет их вредное влияние на характеристики рельсовой продукции, так как обуславливает

появление дополнительных напряжений к имеющимся на межфазных границах включение – матрица деформационным и контактным напряжениям.

Также следует отметить, что полученные данные о повышении концентрации и размеров неметаллических включений от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок согласуются с общепринятыми представлениями о механизмах формирования слитков в процессе кристаллизации: центральная зона затвердевает в последнюю очередь, что предопределяет

ет ее повышенную загрязненность неметаллическими включениями. При этом указанная закономерность наблюдается и для недеформирующихся силикатных включений. Такое распределение включений в объеме заготовок несколько снижает их негативное влияние на качество рельсов, поскольку в процессе прокатки более интенсивной деформации подвергаются приконтактные слои заготовок, а по мере приближения к осевой зоне заготовок интенсивность деформации снижается.

Определенный интерес представляют полученные данные о наличии в заготовках рельсовой стали включений нитридов алюминия и других глиноземистых включений с учетом того факта, что в соответствии с действующим стандартом (ГОСТ Р 51685 – 2013) допустимое содержание алюминия в стали ограничено пределом не более 0,004 %.

Выводы

Металлографическими и рентгенографическими исследованиями установлен состав и закономерности

распределения неметаллических включений по зонам кристаллизации непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э90ХАФ: выявлены неметаллические включения в виде оксидов точечных, нитридов алюминия, сульфидов марганца, силикатов недеформирующихся ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$); определено, что концентрация и размеры неметаллических включений имеют тенденцию к увеличению от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок, что согласуется с общепринятыми представлениями о механизмах формирования слитков в процессе кристаллизации.

Раскрыт механизм деформации двухфазных силикатных неметаллических включений и их влияния на качество рельсовой продукции. Неоднородная деформируемость сложных силикатных включений усугубляет их вредное влияние на качество рельсовой продукции, так как обуславливает появление дополнительных напряжений к имеющимся на межфазных границах включение – матрица деформационным и контактными напряжениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Смирнов Л.А., Дерябин А.А., Добужская А.Б. Повышение качества отечественных железнодорожных рельсов // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2005. № 6. С. 43–49.
- Черняк С.С. Проблемы повышения эксплуатационной стойкости стали. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2007. 345 с.
- Sawley K., Kristan D. Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2003. Vol. 26. No. 10. P. 1019–1029. <http://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00671.x>
- Самойлович Ю.А. Упрочнение железнодорожных рельсов путем изотермической закалки на нижний бейнит // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2013. № 8. С. 39–44.
- Farrigia D., Husain Z., Santisteban V., Kieber B. Research fund for coal and steel. PACROLP: the prediction and avoidance of cracking in long product hot rolling. Final report. European Commission, 2009. 149 p.
- Filippini S.A., Ammerling W.J. Further developments in wire rod and bar production using the 3-roll technology // Iron and Steel Technology. 2009. Vol. 6. No. 9. P. 38–44.
- Юрьев А.Б., Годик Л.А., Нугуманов Р.Ф., Козырев Н.А., Корнева Л.В. Производство и качество рельсов из стали марки Э90ХАФ // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 34–37.
- Jung I.-H., Decterev S.A., Pelton A.D. A thermodynamic model for deoxidation equilibria in steel // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2004. Vol. 35. No. 3. P. 493–507. <http://doi.org/10.1007/s11663-004-0050-4>
- Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А., Бойков Д.В. Совершенствование технологии раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 10. С. 721–727. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-721-727>
- Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов // Известия вузов.
- Smirnov L.A., Deryabin A.A., Dobuzhskaya A.B. Improving quality of domestic railway rails. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2005, no. 6, pp. 43–49. (In Russ.).
- Chernyak S.S. *Problems of Steel Service Life Increasing*. Irkutsk: IrSTU Publ., 2007, 345 p. (In Russ.).
- Sawley K., Kristan D. Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2003, vol. 26, no. 10, pp. 1019–1029. <http://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00671.x>
- Samoilovich Yu.A. Strengthening of railway rails by isothermal quenching on lower bainite. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2013, no. 8, pp. 39–44. (In Russ.).
- Farrigia D., Husain Z., Santisteban V., Kieber B. *Research fund for coal and steel. PACROLP: the prediction and avoidance of cracking in long product hot rolling. Final report*. European Commission, 2009, 149 p.
- Filippini S.A., Ammerling W.J. Further developments in wire rod and bar production using the 3-roll technology. *Iron and Steel Technology*. 2009, vol. 6, no. 9, pp. 38–44.
- Yur'ev A.B., Godik L.A., Nugumanov R.F., Kozыrev N.A., Korneva L.V. Production and quality of 90KhAF steel rail. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 8, pp. 34–37. (In Russ.).
- Jung I.-H., Decterev S.A., Pelton A.D. A thermodynamic model for deoxidation equilibria in steel. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2004, vol. 35, no. 3, pp. 493–507. <http://doi.org/10.1007/s11663-004-0050-4>
- Kozыrev N.A., Protopopov E.V., Umanskiy A.A., Boikov D.V. Improved deoxidation technologies and secondary treatment of rail electric steel in order to improve the quality of railway rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 10, pp. 721–727. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-721-727>
- Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Temlyantsev M.V., Golovatenko A.V. Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5,

- Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 298–304. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
11. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of plastic inclusions in U71Mn high-speed heavy-rail steel refined by CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO slag // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019. Vol. 50. No. 1. P. 459–470. <http://doi.org/10.1007/s11663-018-1451-0>
 12. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. No. 4. P. 1939–1944. <http://doi.org/10.1515/amm-2016-0312>
 13. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009. Vol. 16. No. 3. P. 20–26. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
 14. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at OAO NTMK // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009. Vol. 2009. No. 7. P. 581–586. <http://doi.org/10.1134/s0036029509070064>
 15. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000. Vol. 9. No. 6. P. 700–709. <http://doi.org/10.1361/105994900770345584>
 16. Hullen P. van, Ammerling J. Targets, implementation and operating results of the modernization project of a bar mill for engineering steel. *Proceedings of the 3rd European Rolling Conference METEC Congress 2003*. Düsseldorf. 16–20 June 2003. Düsseldorf. 2003. P. 171–176.
 17. Могильный В.В. Влияние кальция на загрязненность и морфологию неметаллических включений в рельсовой стали. В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали. Сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара. Екатеринбург: Уральский институт металлов, 2005. С. 59–64.
 18. Павлов В.В., Корнева Л.В., Полевой Е.В., Волков К.В. Оценка склонности рельсов к образованию контактно-усталостных дефектов. В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. Екатеринбург: Уральский институт металлов, 2013. С. 106–112.
 19. Симачев А.С., Темлянцева М.В., Осолкова Т.Н., Перетьяко В.Н., Базайкин В.И. Исследование высокотемпературной пластичности зон кристаллизации непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76Ф // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 10. С. 33–37.
 20. Симачев А.С., Осолкова Т.Н., Темлянцева М.В. Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 2. С. 134–137. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-2-134-137>
 - pp. 298–304. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
 11. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of plastic inclusions in U71Mn high-speed heavy-rail steel refined by CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019, vol. 50, no. 1, pp. 459–470. <http://doi.org/10.1007/s11663-018-1451-0>
 12. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016, vol. 61, no. 4, pp. 1939–1944. <http://doi.org/10.1515/amm-2016-0312>
 13. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009, vol. 16, no. 3, pp. 20–26. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
 14. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at OAO NTMK. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009, vol. 2009, no. 7, pp. 581–586. <http://doi.org/10.1134/s0036029509070064>
 15. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000, vol. 9, no. 6, pp. 700–709. <http://doi.org/10.1361/105994900770345584>
 16. Hullen P. van, Ammerling J. Targets, implementation and operating results of the modernization project of a bar mill for engineering steel. *Proceedings of the 3rd European Rolling Conference METEC Congress 2003, Düsseldorf, 16–20 June 2003*. Düsseldorf, 2003, pp. 171–176.
 17. Mogil'nyi V.V. Influence of calcium on contamination and morphology of nonmetallic inclusions in rail steel. In: *Nonmetallic Inclusions in Rail Steel. Collection of Materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Seminar*. Yekaterinburg: Ural Institute of Metals, 2005, pp. 59–64. (In Russ.).
 18. Pavlov V.V., Korneva L.V., Polevoi E.V., Volkov K.V. Assessment of the tendency of rails to form contact fatigue defects. In: *Improving Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Fasteners. Collection of Scientific Reports from the Meeting of "Rail Commission" Non-Commercial Partnership, Moscow region, October 23–25, 2012*. Yekaterinburg: Ural Institute of Metals, 2013, pp. 106–112. (In Russ.).
 19. Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., Peretyat'ko V.N., Bazaikin V.I. Research of high-temperature plasticity of crystallization zones in continuously cast ingots of rail steel EH76F. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 10, pp. 33–37. (In Russ.).
 20. Simachev A.S., Oskolkova T.N., Temlyantsev M.V. Influence of nonmetallic inclusions in rail steel on its high-temperature plasticity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 134–137. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-2-134-137>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Арте́м Серге́евич Сима́чев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Та́тьяна Николаевна Осолко́ва, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: osolkova@kuz.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: osolkova@kuz.ru

Александр Александрович Уманский, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Aleksandr A. Umanskii, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Алексей Валерьевич Головатенко, к.т.н., технический директор, АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

E-mail: Aleksey.Golovatenko@evraz.com

Aleksei V. Golovatenko, *Cand. Sci. (Eng.)*, Technical Director, JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”

E-mail: Aleksey.Golovatenko@evraz.com

Поступила в редакцию 02.06.2020

После доработки 26.08.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 02.06.2020

Revised 26.08.2020

Accepted 26.10.2020
