

УДК 620.186.14:[669.14.018.294.2:621.77.016.2]

## ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ

*Симачев А.С., ведущий инженер кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК»*

*Осколкова Т.Н., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (oskolkova@kuz.ru)*

*Темлянцева М.В., д.т.н., проректор по научной работе и инновациям, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии*

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

**Аннотация.** Представлены результаты изучения влияния неметаллических включений на высокотемпературную пластичность рельсовой стали Э76Ф. Установлен максимум пластичности всех трех зон непрерывнолитой заготовки, критерием которого является степень деформации сдвига. Представлены результаты высокотемпературного кручения образцов, нагретых в диапазоне температур 950 – 1250 °С и выдержке 10 мин при этих температурах всех трех зон непрерывнолитой заготовки рельсовой электростали. Выявлено наличие оксидов и силикатов в корковой зоне, оксидов и оксисиликатов в зоне столбчатых кристаллов, а также сульфидов, оксидов, силикатов и алюмосиликатов в центральной зоне непрерывнолитой заготовки. Установлено, что наибольшее количество негативно влияющих на критерий пластичности включений наблюдается в центральной зоне заготовки.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, силикаты, сульфиды, оксиды, непрерывнолитая заготовка, рельсовая электросталь, микроструктура, высокотемпературная пластичность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-134-137

Чистота рельсовой стали по неметаллическим включениям является одним из основных факторов, определяющих качество рельсов, их долговечность и склонность к образованию усталостных трещин. Образование контактно-усталостных дефектов, как правило, начинается от внутренних концентраторов напряжений в виде скоплений неметаллических включений [1 – 3].

Полный анализ неметаллических включений состоит из определения их химического состава, структуры и количественной оценки загрязненности металла различными включениями. Определяют такие признаки включений, как форма, цвет, прозрачность, деформируемость, взаимодействие с определенными химическими реактивами и др. Сопоставляя данное включение с эталонами и используя классификационные таблицы, его идентифицируют.

В зависимости от химического состава сталь может содержать включения различных видов (оксиды, сульфиды, нитриды), различающиеся по размерам, форме и распределению. Металлографический метод наиболее удобен и во многих случаях позволяет достаточно надежно идентифицировать включения без использования других методов [4].

Все известные механизмы разрушения металлов и сплавов предполагают развитие предшествующей пластической деформации [5, 6]. Влияние неметаллических

включений на разрушение стали определяется изменениями, которые они могут внести в известные механизмы деформации и разрушения. Механические свойства стали существенно изменяются с повышением температуры и реагируют на все структурные изменения: рекристаллизацию, полиморфное превращение, рост зерен. Неметаллические включения способствуют локализации деформации независимо от механизма ее развития путем взаимодействия с движущимися в плоскостях дислокациями, тормозя миграцию границ зерен [7, 8].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния неметаллических включений, образующихся в процессе кристаллизации непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) рельсовой стали Э76Ф, на высокотемпературную пластичность.

Объектом изучения являлись цилиндрические образцы, вырезанные из трех зон (корковой, столбчатых кристаллов и центральной) НЛЗ рельсовой стали марки Э76Ф. Исследовали микроструктуру и оценивали виды неметаллических включений по ГОСТ 1778 – 70.

В корковой зоне НЛЗ были обнаружены оксиды точечные (балл 1) и небольшое количество нитридов алюминия (балл 1). В зоне столбчатых кристаллов также наблюдали присутствие оксидов точечных (балл 1) и незначительное количество силикатов недеформирующихся (балл 1). Центральная зона НЛЗ рельсовой стали

марки Э76Ф оказалась самой загрязненной по количеству и видам неметаллических включений: выявлены оксиды точечные (балл 2, 3, 5), сульфиды (балл 1, 2, 4), силикаты недеформирующиеся (балл 1, 4, 5), силикаты хрупкие (балл 3, 4) [9, 10].

После изучения типа неметаллических включений проводили высокотемпературное кручение образцов, нагретых в диапазоне температур 950 – 1250 °С с разным временем выдержки при этих температурах, до их разрушения. За предельную степень деформации металла до разрушения (критерий пластичности) принимали степень деформации сдвига. Проведенные исследования показали, что максимальная пластичность наблюдается при температуре нагрева 1150 °С и выдержке 10 мин во всех трех зонах НЛЗ (рис. 1) [11].

Изучение неметаллических включений после высокотемпературной пластической деформации проводили с помощью растрового электронного микроскопа «Philips SEM-515». Необходимо отметить, что в процессах нагрева под обработку металлов давлением образуются оксиды железа различного состава ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). В целом следует отметить, что после проведения испытаний на высокотемпературное кручение в местах, прилежащих к неметаллическим включениям, произошел разрыв стали [12, 13].

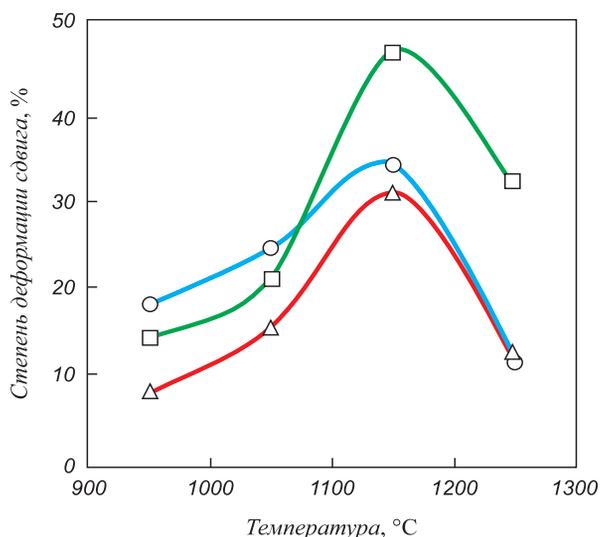


Рис. 1. Степень деформации сдвига в корковой зоне (O), в зоне столбчатых кристаллов (□) и в центральной зоне (Δ)

Fig. 1. Shear deformation degree in the skin zone (O), in the zone of columnar crystal (□) and in the central zone (Δ)

В корковой зоне располагаются оксиды состава  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 2, а). Также наблюдается незначительное количество силикатов железа ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  — фаялит) и

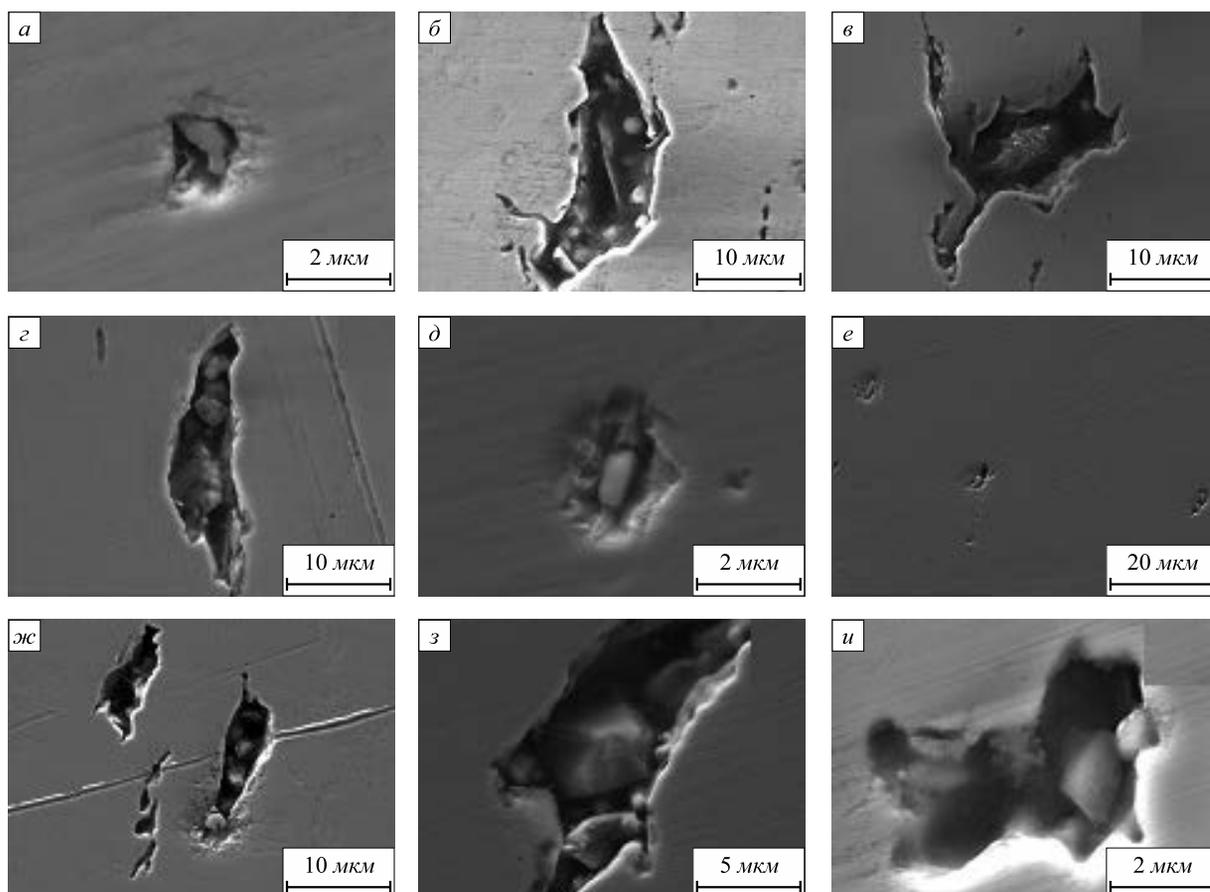


Рис. 2. Неметаллические включения в различных зонах НЛЗ стали марки Э76Ф

Fig. 2. Non-metallic inclusions in different zones of continuously cast ingot of E76F steel

марганца ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$  – родонит), которые имеют шаровидную форму (рис. 2, б).

В зоне столбчатых кристаллов наблюдаются точечные оксиды алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также двухфазные оксиды  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и оксисиликатные включения типа  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$  (рис. 2, в, з).

Исследование образцов центральной зоны НЛЗ рельсовой стали с помощью растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа (рис. 3) выявило наличие сульфидов марганца (рис. 2, д, е).

На рис. 2, ж представлены неметаллические включения, расположенные в виде скоплений. Результаты рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии позволяют идентифицировать данные соединения как сульфид марганца (MnS), оксиды железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), силикаты железа ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) и марганца ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Также обнаружены включения неправильной кубической и ромбической формы: алюмосиликаты ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  – силлиманит) (рис. 2, з, и), которые относятся к недеформирующимся силикатам и значительно снижают пластические свойства стали, увеличивая скорость роста усталостных трещин [14, 15].

Ранее было установлено [16], что при проведении высокотемпературного кручения образцы, вырезанные из центральной зоны НЛЗ, наиболее склонны к росту зерен в сравнении с корковой более мелкозернистой зоной, что способствует потере пластичности стали.

**Выводы.** Присутствие большого количества недеформирующихся силикатов алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), силикатов железа ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) и марганца ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ) способствует локализации деформации и совместно с ростом зерен аустенита приводит к уменьшению степени деформации сдвига.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева и др. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
2. Фейлер С.В., Полевой Е.В., Дементьев В.П. Исследование ликвационных процессов при непрерывной разливке рельсовой стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2014. № 2. С. 23 – 25.
3. Луценко В.А., Боровик И.В., Заблудский И.Н., Куберский С.В. Моделирование неустановившегося процесса горячей прокатки непрерывнолитых слябов с учетом ликвации. – В кн.: Сб. науч. тр. Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганск, 2010. С. 10 – 17.
4. Еланский Г.Н., Линчевский Б.В., Кальменев А.А. Основы производства и обработки металлов. – М.: изд. Московского гос. вечернего металлургического ин-та, 2005. – 417 с.
5. Дзугутов М.Я. Пластичность и деформируемость высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 303 с.
6. Пуарье Ж.П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. – М.: Металлургия, 1982. – 272 с.

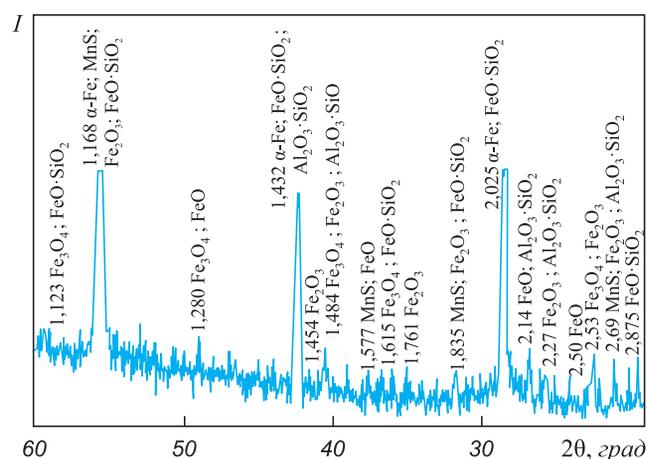


Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы образца из центральной зоны непрерывно литой заготовки рельсовой стали марки Э76Ф

Fig. 3. Diffraction pattern fragment of the sample from the central zone of continuously cast ingot of E76F steel

7. Голубцов В.А., Шубя Л.Г., Усманов Р.Г. Внепечная обработка и модифицирование стали // Бюллетень «Черная металлургия». 2006. № 11. С. 47 – 51.
8. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
9. Симачёв А.С. Изучение влияния неметаллических включений на высокотемпературную пластичность непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф. – В кн.: Сб. науч. тр. IV-ой Международной науч.-практич. конф. «Современные инновации в науке и технике». Т. 4. – Курск, 2014. С. 122 – 124.
10. Протопопов Е.В., Ганзер Л.А., Фейлер С.В. Экспериментальные исследования гидродинамики металла в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 25 – 29.
11. Симачев А.С., Темлянец М.В., Осколкова Т.Н. и др. Исследование высокотемпературной пластичности зон кристаллизации непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76Ф // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 10. С. 33 – 37.
12. Рошин В.Е., Рошин А.В. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 572 с.
13. Рошин В.Е., Рошин А.В. Дефекты стальных слитков и заготовок: учебное пособие для вузов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 281 с.
14. Великанов А.В., Рейхарт В.А., Капорцев В.Н. Влияние методов внепечной обработки на качество рельсов из кислородно-конверторной стали. – В кн.: Сб. науч. тр. «Неметаллические включения в сталях». – М.: Металлургия, 1983. С. 35 – 42.
15. Губенко С.И. Особенности процессов локального разрушения стали вблизи неметаллических включений // Новости науки Приднепровья. 2002. № 1-2. С. 75 - 84.
16. Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., etc. High-temperature plasticity of the solidification zones of continuous-cast Э76Ф rail-steel billet // Steel in Translation. 2015. Vol. 44. № 10. P. 719 – 722.

Поступила 20 апреля 2015 г.

## INFLUENCE OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN RAIL STEEL ON ITS HIGH-TEMPERATURE PLASTICITY

*A.S. Simachev, T.N. Oskolkova, M.V. Temlyantsev*

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The article presents the research results of the influence of non-metallic inclusions on high-temperature plasticity of E76F rail steel. The maximum plasticity of all three zones of the continuously cast ingot, the criterion of which is the degree of shear strain, was established. The results of high-temperature twisting of samples which were heated from 950° to 1250° and soaked for 10 minutes in all three zones of the continuous casting ingot made from rail steel are presented. The presence of oxides and silicates in the rim zone, oxides and oxisilicates in the zone of radial-columnar crystals, as well as sulfides, oxides, silicates and aluminosilicates in the central zone of the continuous casting ingot were found. It was established that the greatest amount of inclusions is concentrated in the central zone of the continuously cast ingot which leads to reducing of plasticity criterion.

**Keywords:** non-metallic inclusions, silicates, sulphides, oxides, continuously cast ingot, rail electric steel, microstructure, high-temperature plasticity.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-2-134-137

### REFERENCES

1. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Oskolkova T.N., Gavrilov V.V. *Defekty i kachestvo rel'zovoi stali* [Defects and quality of rail steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 218 p. (In Russ.).
2. Feiler S.V., Polevoi E.V., Dement'ev V.P. The study of phase separation processes in continuous casting of rail steel. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2014, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.).
3. Lutsenko V.A., Borovik I.V., Zablodskii I.N., Kuberskii S.V. Modeling of an unsteady-state process of hot rolling of continuously cast slabs subject to the liquidation. In: *Sb. nauch. tr. Resursozberigayuchi tekhnologii virobnitstva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni* [Collected scientific papers Resource-saving production technologies and material pressure processing in mechanical engineering]. Lugansk, 2010, pp. 10–17. (In Russ.).
4. Elanskii G.N., Linchevskii B.V., Kal'menev A.A. *Osnovy proizvodstva i obrabotki metallov* [Basis of production and treatment of metal]. Moscow: izd. Moskovskogo gos. vechernego metallurgicheskogo in-ta, 2005, 417 p. (In Russ.).
5. Dzugutov M.Ya. *Plastichnost' i deformiruemost' vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plasticity and deformability of high-alloy steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 303 p. (In Russ.).
6. Gean-Paul Poirier. *Plasticite a haute temperature des solides cristallins*. Paris: Eyrolles, 1976. (Russ.ed.: Poirier G.- P. *Vysokotemperaturnaya plastichnost' kristallicheskich tel*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 272 p.).
7. Golubtsov V.A., Shubya L.G., Usmanov P.G. Out-of-furnace processing and steel modification. *Byulleten' "Chernaya metallurgiya"*. 2006, no. 11, pp. 47–51. (In Russ.).
8. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V. *Nemetallicheskie vklucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2005, 536 p. (In Russ.).
9. Simachev A.S. The study of the influence of non-metallic inclusions on high-temperature plasticity of continuously cast ingot of E76F rail steel. In: *Sb. nauch. tr. IV-oi Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf. "Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike"* [Collected scientific papers of IVth International Scientific Conference "Modern innovations in science and engineering"]. Vol. 4. Kursk, 2014, pp. 122–124. (In Russ.).
10. Protopopov E.V., Ganzer L.A., Feiler S.V. Experimentai study of metal melt hydrodynamics in continuous casting tundish. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 25–29. (In Russ.).
11. 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 EH76F rail steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 10, pp. 33–37. (In Russ.).
12. Roshchin V.E., Roshchin A.V. *Elektrometallurgiya i metallurgiya stali: uchebnik* [Electrometallurgy and steel metallurgy: Textbook]. Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2013, 572 p. (In Russ.).
13. Roshchin V.E., Roshchin A.V. *Defekty stal'nykh slitkov i zagotovok: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Defects of steel ingots and workpieces: manual for higher educational institutions]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2008, 281 p. (In Russ.).
14. Velikanov A.V., Reikhart V.A., Kaportsev V.N. Influence of out-of-furnace treatment methods on the rail quality from oxygen-converter steel. In: *Sb. nauch. tr. "Nemetallicheskie vklucheniya v stalyakh"* [Collected scientific papers "Non-metallic inclusions in steels"]. Moscow: Metallurgiya, 1983, pp. 35–42. (In Russ.).
15. Gubenko S.I. Peculiarities of steel local destruction processes near non-metallic inclusions. *Novosti nauki Pridneprov'ya*. 2002, no. 1–2, pp. 75–84. (In Russ.).
16. Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., Peretyat'ko V.N., Bazaikin V.I. High-temperature plasticity of the solidification zones of continuous-cast Э76Ф rail-steel billet. *Steel in Translation*. 2015, vol. 44, no. 10, pp. 719–722.

### *Information about the authors:*

*A.S. Simachev, Leading Engineer of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"*

*T.N. Oskolkova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"*

(oskolkova@kuz.ru)

*M.V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology", Vice-Rector for Research and Innovations*

Received April 20, 2015