

Оригинальная статья

УДК 669.187

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

© 2023 г. Л. В. Думова, Е. В. Протопопов, А. А. Уманский

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

Аннотация. На основании комплексных исследований, проведенных с использованием методов оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, определена природа характерных металлургических дефектов железнодорожных рельсов производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Дефекты, являющиеся причиной отбраковки железнодорожных рельсов при ультразвуковом контроле их качества, преимущественно представляют собой расслоения со скоплениями неметаллических включений в виде оксидов кремния и алюминия, алюмосиликатов и сульфидов марганца. Расслоения локализуются в шейке рельсовых профилей, вытянуты в направлении прокатки, имеют длину до 2 мм. На основании статистических исследований, проведенных с использованием методики множественного регрессионного анализа для выборки из 200 плавок рельсовой стали марки Э76ХФ, установлено, что повышение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате ковш-печь, уменьшение окисленности стали на выпуске из дуговой электропечи, снижение содержания серы, фосфора, меди и олова в готовой стали обуславливают уменьшение отбраковки рельсов по внутренним дефектам. Анализ относительной степени и механизмов влияния каждого из перечисленных параметров на вероятность образования внутренних дефектов рельсов позволил установить, что основное влияние на отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения оказывают окисленность стали на выпуске из печи и параметры (длительность и интенсивность продувки инертным газом) ее продувки инертным газом в ковше. Металлографическими исследованиями проб расплава рассматриваемой рельсовой стали после внепечной обработки и проб, отобранных от непрерывнолитых заготовок, подтверждено, что снижение содержания кислорода в стали на выпуске из печи совместно с увеличением длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом в сталеразливочном ковше значительно снижают загрязненность жидкой стали и непрерывнолитых заготовок оксидными, силикатными и сульфидными неметаллическими включениями, то есть потенциально уменьшают интенсивность образования внутренних дефектов рельсов.

Ключевые слова: рельсовая сталь, дуговая электропечь, внепечная обработка, непрерывнолитые заготовки, железнодорожные рельсы, внутренние дефекты, неметаллические включения

Для цитирования: Думова Л.В., Протопопов Е.В., Уманский А.А. Анализ процессов формирования металлургического качества железнодорожных рельсов из электростали // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 47 – 57. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57)

Original article

ANALYSIS OF PROCESSES FORMATION OF METALLURGICAL QUALITY OF RAILWAY RAILS FROM ELECTRIC STEEL

© 2023 L. V. Dumova, E. V. Protopopov, A. A. Umanskii

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

Abstract. Based on comprehensive studies conducted using optical and electron microscopy methods, X-ray phase analysis, the nature of characteristic metallurgical defects of railway rails manufactured by JSC EVRAZ ZSMK has been determined. These defects, which are the cause of rejection of railway rails during ultrasonic quality control, are mainly stratifications with accumulations of non-metallic inclusions in the form of silicon and aluminum oxides, aluminosilicates and manganese sulfides. Such bundles are localized in the neck of the rail profiles, elongated in the direction of rolling and have a length of up to 2 mm. Based on statistical studies conducted using the multiple regression analysis technique for a sample of 200 melts of E76XF grade rail steel, it was found that an increase in the duration and intensity of purging the melt of rail steel with an inert gas during processing on the ladle furnace unit, a decrease in the oxidation of steel at the outlet of an electric arc furnace, a decrease in sulfur, phosphorus, copper and tin in the finished steel cause a reduction in the rejection of rails for internal defects. The analysis of the relative degree of influence and the mechanisms of influence of each of the listed parameters on the probability of the formation of internal defects of rails allowed us to establish that the main influence on the amount of rejection of rails for defects of metallurgical origin is the oxidation of steel at the outlet from the furnace and the parameters of its purging with inert gas in the bucket (duration and intensity of purging with inert gas). Metallographic studies of melt samples of the specified rail steel after out-of-furnace processing and samples taken from continuously cast billets of this steel confirmed that a decrease in the oxygen content in the steel at the outlet from the furnace, together with an increase in the duration and intensity of purging the melt with inert gas in the steel ladle significantly reduce the contamination of liquid steel and continuously cast billets with oxide, silicate and sulfide non-metallic inclusions, that is, potentially reduce the intensity of the formation of internal defects of the rails.

Keywords: rail steel, electric arc furnace, out-of-furnace processing, continuously cast billets, railway rails, internal defects, non-metallic inclusions

For citation: Dumova L.V., Protopopov E.V., Umanskii A.A. Analysis of metallurgical quality formation processes of railway rails made of electric steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 47 – 57. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57)

Введение

Повышение эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов является крайне актуальной проблемой, от решения которой во многом зависит успешность функционирования отечественной экономики. Недостаточная пропускная способность железнодорожных путей является фактором, в значительной степени сдерживающим повышение товарооборота со странами Азии. Особенно негативно это сказывается на функционировании различных отраслей промышленности с учетом текущей геополитической ситуации.

Многочисленные исследования [1 – 6] показывают, что на эксплуатационную стойкость железнодорожных рельсов определяющее влияние оказывает их металлургическое качество, то есть наличие и размеры дефектов металлургического происхождения, в том числе скоплений неметаллических включений.

В настоящее время можно выделить ряд основных направлений по повышению металлургического качества рельсов за счет совершенствования технологии производства рельсовой стали. Первым из указанных направлений является совершенствование состава металлозавалки. Имеются исследования, обосновывающие продуктивность использования «чистого лома» с пониженной концентрацией примесей цветных металлов [7], эффективность применения горячебрикетированного железа взамен традицион-

ных видов металлошихты с целью снижения содержания вредных примесей (серы, фосфора, цветных металлов) в стали [8]. Ко второму направлению можно отнести совершенствование режимов обработки расплава рельсовой стали в ковше. В работах [9, 10] представлено описание новых режимов раскисления рельсовой стали при обработке на агрегате ковш-печь (АКП), обеспечивающих возможность лучшей флотации продуктов раскисления и трансформации оставшихся в металле продуктов раскисления в глобулы. Проведенные в работе [11] термодинамические расчеты раскисления рельсовой стали силикокальцием и алюмокальцием позволили разработать технологию внепечной обработки, обеспечивающую повышение чистоты расплава по неметаллическим включениям. Исследования по модифицированию рельсовой стали редкоземельными металлами в процессе внепечной обработки на АКП и вакууматоре [12] свидетельствуют о снижении загрязненности рельсовой стали оксидными включениями, повышении степени десульфурации и уменьшении концентрации кислорода в хрупкоразрушенных неметаллических включениях. Третье направление включает в себя исследования по улучшению ассимиляции неметаллических включений шлаком в промежуточном ковше МНЛЗ. Результаты работы [13] свидетельствуют о возможности значительного улучшения ассимилирующей способности шлака за счет применения шлакообразующей смеси

(ШОС) на основе пылевидных отходов из аспирационных установок производства алюминия, ферросилиция и извести. Улучшению процесса ассимиляции неметаллических включений также способствует организация направленной гидродинамики металла в промежуточном ковше МНЛЗ за счет применения струегасителей и перегородок [14, 15].

Целью настоящей работы является анализ влияния параметров выплавки рельсовой стали в дуговой электропечи и ее внепечной обработки на отбраковку рельсов по внутренним дефектам в условиях АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК). Необходимо отметить, что на сегодняшний день основная масса железнодорожных рельсов в России производится из электростали в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (примерно 80 % от общего объема производства железнодорожных рельсов). Выплавка рельсовой стали в дуговых электропечах является отличительной особенностью отечественного рельсового производства от ведущих зарубежных производителей железнодорожных рельсов (Япония, Австрия, Франция, США – в указанных странах рельсы производят из конвертерной стали) [16]. Технологическая схема производства рельсовой стали на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» включает в себя выплавку стали в дуговой электропечи, обработку на агрегате ковш-печь и камерном вакууматоре, а также разливку на МНЛЗ в заготовки сечением 300 × 365 мм. В электросталеплавильном цехе освоено производство рельсовой стали с использованием в шихте 30 – 50 % чугуна (первоначально жидкого, в настоящее время чушкового) [17 – 19]. Непрерывная разливка стали осуществляется на модернизированной МНЛЗ с применением электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе и технологии «мягкого» обжата формируемых заготовок [20]. Производство рельсов осуществляется на новом универсальном рельсобалочном стане, запущенном в эксплуатацию в 2013 г. [21]. Сортмент рассматриваемого стана включает в себя дифференцированно термоупрочненные рельсы длиной до 100 м [22, 23]. При этом 100 % рельсов подвергаются ультразвуковому контролю качества структуры в потоке стана, отбраковка по результатам которого в настоящее время находится на уровне 2 – 3 % от общего объема производства.

Тематика настоящей работы является актуальной как для АО «ЕВРАЗ ЗСМК», так и для отечественной экономики в целом.

Методика проведения исследований

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе исследовали природу характерных дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле качества. Для исследова-

ния таких дефектов использовали металлографический анализ (оптический микроскоп OLYMPUS GX-51), для определения вида неметаллических включений в областях локализации дефектов – рентгенофазовый анализ (дифрактометр Shimadzu XRD-6000). Объектами анализа выступили рельсы от 50 плавов стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Указанная марка рельсовой стали является в настоящее время наиболее массовой и используется для производства рельсов общего назначения.

Второй этап включал в себя статистический анализ влияния параметров выплавки и внепечной обработки указанной рельсовой стали на отбраковку рельсов по результатам ультразвукового контроля. Для анализа выбрали следующие параметры:

- состав металлошихты (доля твердого чугуна и металлического лома различных категорий в металлозавалке);
- температура выпуска стали из печи;
- окисленность стали перед выпуском из печи;
- удельные расходы шлакообразующих материалов на выпуске стали из печи в ковш;
- длительность и интенсивность продувки аргоном и азотом при обработке на АКП;
- температура окончания обработки стали на АКП;
- удельные расходы шлакообразующих материалов при обработке на АКП;
- химический состав шлака АКП (содержание оксидов и основность);
- длительность обработки под вакуумом;
- интенсивность продувки в процессе вакуумирования;
- длительность и интенсивность очистительной продувки после снятия вакуума;
- температура окончания вакуумной обработки;
- расход шлакообразующих в процессе вакуумной обработки.

При проведении статистических исследований использовали стандартную методику множественного регрессионного анализа. Исследования проводили на выборке из 200 плавов рельсовой стали марки Э76ХФ.

На третьем этапе провели анализ загрязненности рельсовой стали после внепечной обработки непрерывнолитых заготовок неметаллическими включениями. В качестве объекта исследований использовали образцы, отобранные от 20 плавов с условно «благоприятным» (10 плавов) и «неблагоприятным» (10 плавов) сочетанием технологических параметров, оказывающих значимое влияние на образование металлургических дефектов (перечень параметров определен по результатам предыдущего этапа статистических исследований). Для отбора проб

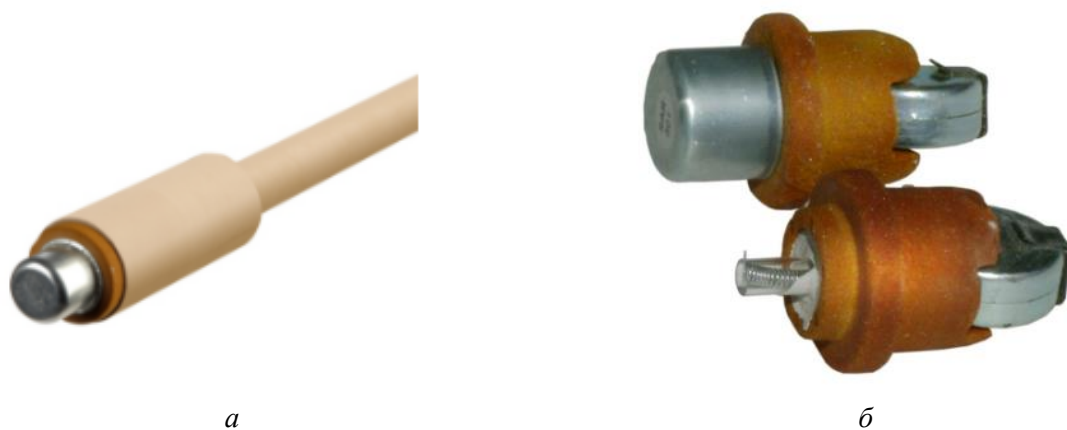


Рис. 1. Погружной пробоотборник:
 а – общий вид; б – головка пробоотборника
 Fig. 1. Submersible sampler:
 а – general view; б – sampler head

от расплава использовали одноразовые погружные пробоотборники (рис. 1), которые одеваются на манипулятор. Продолжительность погружения пробоотборника в расплав составляет 5 – 10 сек., глубина погружения находится ниже уровня шлака, но не превышает 2/3 от длины пробоотборника. В процессе погружения колпачок расплавляется и жидкая сталь по кварцевой трубке поступает в изложницу.

Анализ загрязненности неметаллическими включениями проб расплава рельсовой стали проводили с использованием стандартной методики по ГОСТ 1778 – 70, согласно которой загрязненность включениями плавки определяется по формуле:

$$I = \frac{b \sum a_i m_i}{l}, \quad (1)$$

где b – цена деления окулярной шкалы при данном увеличении, мкм; a_i – средний размер включений (в делениях окулярной шкалы); m_i – количество включений; l – длина подсчета, мкм.

Для оценки загрязненности неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали использовали методику полуколичественного анализа, заключающуюся в сравнении неметаллических включений, выявленных в шлифах при увеличении в 100 крат, со стандартными (эталонными) пятибалльными шкалами (наименее загрязненные пробы оцениваются баллом 1, наиболее загрязненные – 5). Определение типа характерных неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках проводили с использованием метода электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп Philips SEM 515).

Результаты исследований и их обсуждение

Металлографическими исследованиями характерных дефектов рельсов из стали марки Э76ХФ, выявленными в ходе ультразвукового контроля и являющимися причинами отбраковки рельсов, установлено, что дефекты преимущественно (в 95 % случаев) представляют собой расслоения (внутренние трещины) со скоплениями неметаллических включений. Расслоения локализуются в шейке рельсовых профилей, вытянуты в направлении прокатки и имеют длину до 2 мм (фрагменты дефекта приведены на рис. 2).

С использованием рентгенофазового анализа установлено, что в зоне расположения расслоений имеются скопления оксидов кремния и алюминия, алюмосиликатов и сульфидов марганца (рис. 3).

На основании результатов множественного регрессионного анализа выборки плавки стали марки Э76ХФ установлено, что значимое влияние на отбраковку рельсов по внутренним дефектам оказывают окисленность стали на выпуске из ДСП; длительность и интенсивность продувки инертным газом при обработке на АКП; содержание серы, фосфора, меди и олова в готовой стали:

$$\begin{aligned} \text{Бр} = & -9,1 + 0,016[\text{O}] - 0,088\text{Д}_{\text{пр}} - \\ & - 0,122\text{И}_{\text{пр}} + 726,4[\text{S}] + 472,6[\text{P}] + \\ & + 27[\text{Cu}] + 464,3[\text{Sn}], \end{aligned} \quad (2)$$

где Бр – отбраковка, %; $[\text{O}]$ – содержание кислорода в стали на выпуске из печи в ковш, %; $\text{Д}_{\text{пр}}$ – длительность продувки инертным газом на АКП, мин.; $\text{И}_{\text{пр}}$ – интенсивность продувки инертным газом на АКП, м³/ч; $[\text{S}]$, $[\text{P}]$, $[\text{Cu}]$ и $[\text{Sn}]$ – содержание серы, фосфора, меди и олова, %.

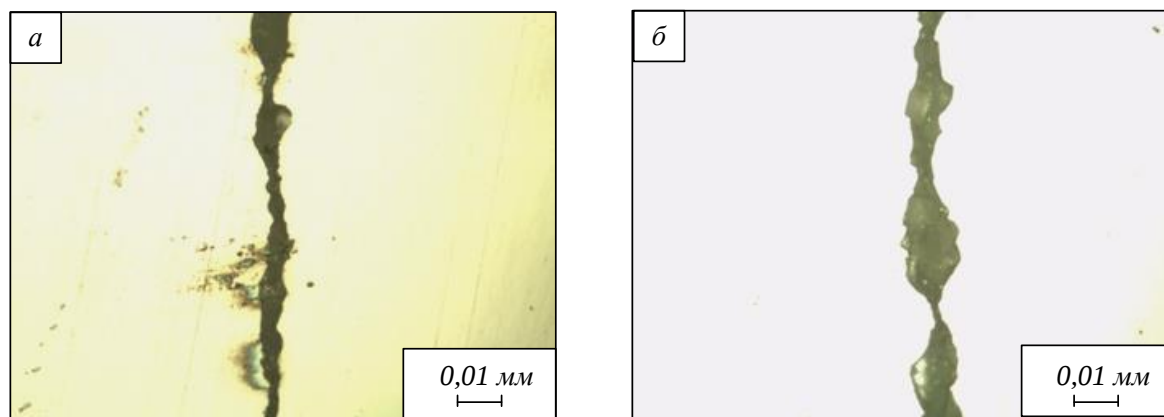


Рис. 2. Фрагменты расслоения в шейке рельса стали марки Э76ХФ:

а – начало фрагмента; б – конец фрагмента

Fig. 2. Fragments of delamination in the neck of the E76F steel rail corresponding to the end section of the defect
а – the beginning of the fragment; б – the end of the fragment

Увеличение содержания кислорода в расплаве на выпуске из печи, то есть перед его раскислением в ковше повышает загрязненность стали первичными оксидными неметаллическими включениями (SiO_2 , Al_2SiO_5 , Al_2O_3). Последние выявлены в местах нахождения внутренних дефектов рельсов (рис. 3) и являются основной причиной образования самих дефектов, поскольку являются недеформируемыми (непластичными) или хрупкоразрушенными (способными вытягиваться в строчки при деформации, однако разрушающиеся при достижении критического значения).

Увеличение продолжительности и интенсивности продувки расплава инертным газом в ковше при обработке на АКП обуславливает более полное удаление неметаллических включений из металла в шлак, что снижает вероятность формирования скоплений неметаллических включений и, соответственно уменьшает вероятность образования внутренних дефектов рельсов.

Повышение содержания серы в стали закономерно приводит к росту концентрации сульфидов в готовых рельсах. Такие включения образуются в процессе кристаллизации стали, по-

этому на их концентрацию оказывает влияние содержание серы в готовой стали. В местах локализации дефектов имеют место скопления сульфидов марганца (рис. 3), а сульфиды железа практически не обнаружены. Это обусловлено высоким содержанием марганца в рассматриваемой рельсовой стали (0,75 – 1,25 % согласно требований ГОСТ Р 51685 – 2013). Механизм влияния данных включений на образование дефектов рельсов связан с различиями коэффициентов их линейного расширения по отношению к основному металлу. В случае наличия включений MnS относительно большого размера или их скоплений между такими включениями и основным металлом после затвердевания формируются микропустоты. Заваривание указанных пустот в процессе дальнейшей горячей прокатки не происходит по причине различной пластичности включений MnS и основного металла, а также наличия вышеприведенных непластичных или хрупкоразрушенных первичных неметаллических включений в местах локализации дефекта.

Механизм отрицательного влияния повышенного содержания меди и олова на качество стального проката заключается в увеличении

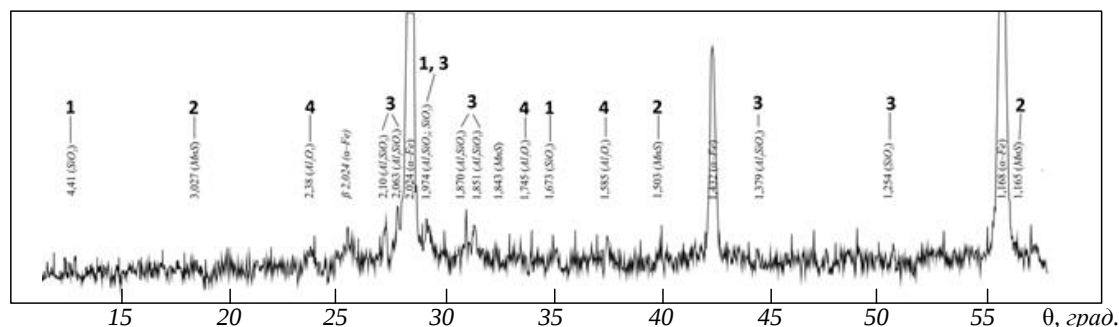


Рис. 3. Рентгенограмма области расслоения в шейке рельса стали марки Э76ХФ:

1 – SiO_2 ; 2 – MnS ; 3 – Al_2SiO_5 ; 4 – Al_2O_3

Fig. 3. Radiograph of the delamination area in the neck of the E76F steel rail:

1 – SiO_2 ; 2 – MnS ; 3 – Al_2SiO_5 ; 4 – Al_2O_3

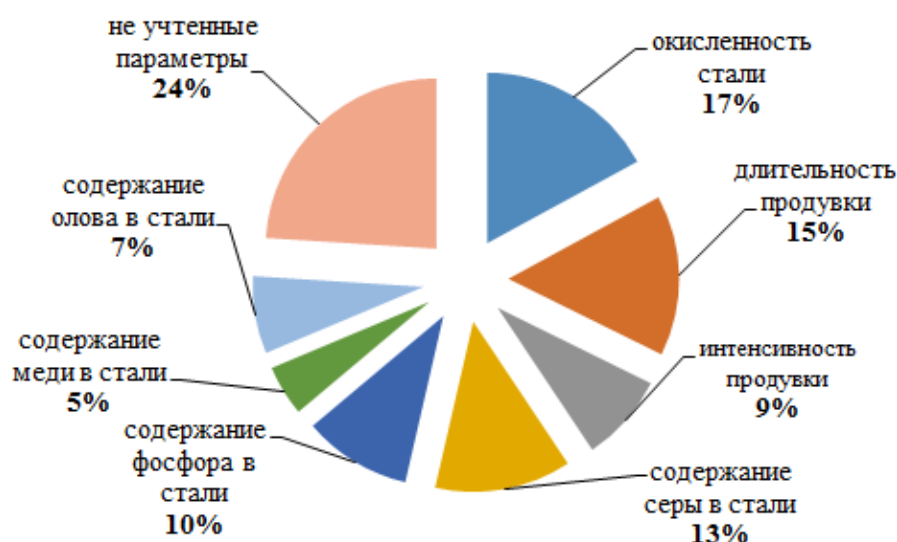


Рис. 4. Относительная степень влияния параметров производства рельсовой стали на отбраковку рельсов по внутренним дефектам

Fig. 4. The relative degree of influence of the parameters of the production of rail steel on the rejection of rails for internal defects

вероятности образования трещин за счет снижения горячей пластичности стали. Примеси цветных металлов имеют значительную склонность к ликвации, что обуславливает их выраженное отрицательное воздействие на качество стальных изделий даже при относительно низких среднеплавочных концентрациях таких элементов в расплаве [24, 25]. Влияние фосфора на вероятность образования дефектов также связано со снижением пластичности стали и обусловлено скоплениями мелких включений фосфидов по границам зерен металла.

Необходимо отметить, что исходя из природы характерных дефектов рельсов (рис. 2, 3) повышенное содержание меди, олова и фосфора в стали выступает в качестве дополнительного фактора, снижающего пластичность материала. Основное влияние на образование дефектов оказывает формирование скоплений первичных оксидных и силикатных неметаллических включений, а также включений MnS.

Проведенный анализ (рис. 4) показал, что вышеприведенные параметры производства рельсовой стали (см. уравнение (1)) в порядке убывания их относительной степени влияния на

вероятность образования внутренних дефектов рельсов распределяются следующим образом: длительность продувки инертным газом, окисленность стали на выпуске из печи, содержания серы и фосфора в стали, интенсивность продувки инертным газом, содержание олова и меди в стали. При этом 24 % относится к влиянию параметров, не учтенных при проведении анализа.

Исследованиями проб расплава рельсовой стали после внепечной обработки, проведенными с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, определено, что при минимальных значениях продолжительности и интенсивности продувки инертным газом в ковше и максимальной окисленности стали на выпуске из печи (в рамках рассматриваемого интервала изменения указанных параметров, табл. 1) загрязненность расплава неметаллическими включениями выше в 1,28 раза по сравнению с наиболее благоприятным сочетанием данных факторов (повышенными длительностью и интенсивностью продувки и наименьшей окисленностью стали). На основании исследований проб непрерывнолитых заготовок, проведенных методом оптической микроскопии, установлено

Т а б л и ц а 1

Загрязненность неметаллическими включениями расплава рельсовой стали марки Э76ХФ после внепечной обработки
Contamination by non-metallic inclusions of the melt of E76F grade rail steel after extra-furnace treatment

Сочетание технологических параметров	Интервал изменения технологических параметров			Загрязненность расплава неметаллическими включениями (И)
	длительность продувки инертным газом в ковше, мин.	интенсивность продувки инертным газом в ковше, м ³ /ч	окисленность стали на выпуске из печи, ppm	
Благоприятное	40 – 46	23,8 – 27,4	552 – 578	18
Неблагоприятное	114 – 128	46,3 – 50,1	172 – 199	23

Загрязненность неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ
Contamination with non-metallic inclusions of continuously cast billets of rail steel E76F

Сочетание технологических параметров	Максимальный балл неметаллических включений по ГОСТ 1778 – 70				
	Силикаты недеформирующиеся	Силикаты пластичные	Оксиды точечные	Оксиды строчечные	Сульфиды
Благоприятное*	2б	2а	1а	–	1б
Неблагоприятное**	5а	3а	4а	4а	3б

Примечание. * – длительность продувки инертным газом в ковше 43 – 48 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше 22,4 – 29,6 м³/ч; окисленность стали на выпуске из печи 565 – 589 ppm; ** – длительность продувки инертным газом в ковше 105 – 119 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше 45,4 – 49,2 м³/ч; окисленность стали на выпуске из печи 186 – 201 ppm.

аналогичное влияние вышеприведенных факторов на загрязненность оксидными силикатными и сульфидными неметаллическими включениями. Определено, что оксидные, силикатные и сульфидные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках от плавок, при которых имела место высокая окисленность стали на выпуске из печи в сочетании с низкой продолжительностью и интенсивностью продувки инертным газом в ковше, имеют больший размер и концентрацию при обратном сочетании значений указанных параметров (низкая окисленность стали

при повышенной длительности и интенсивности продувки инертным газом, табл. 2).

С использованием метода электронной микроскопии установлено, что характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали, концентрация которых является наибольшей в центральной зоне заготовок, представляют собой сульфиды марганца (рис. 5, а), оксиды кремния (рис. 5, б) и алюминия (рис. 5, в), а также силикаты алюминия (рис. 5, г).

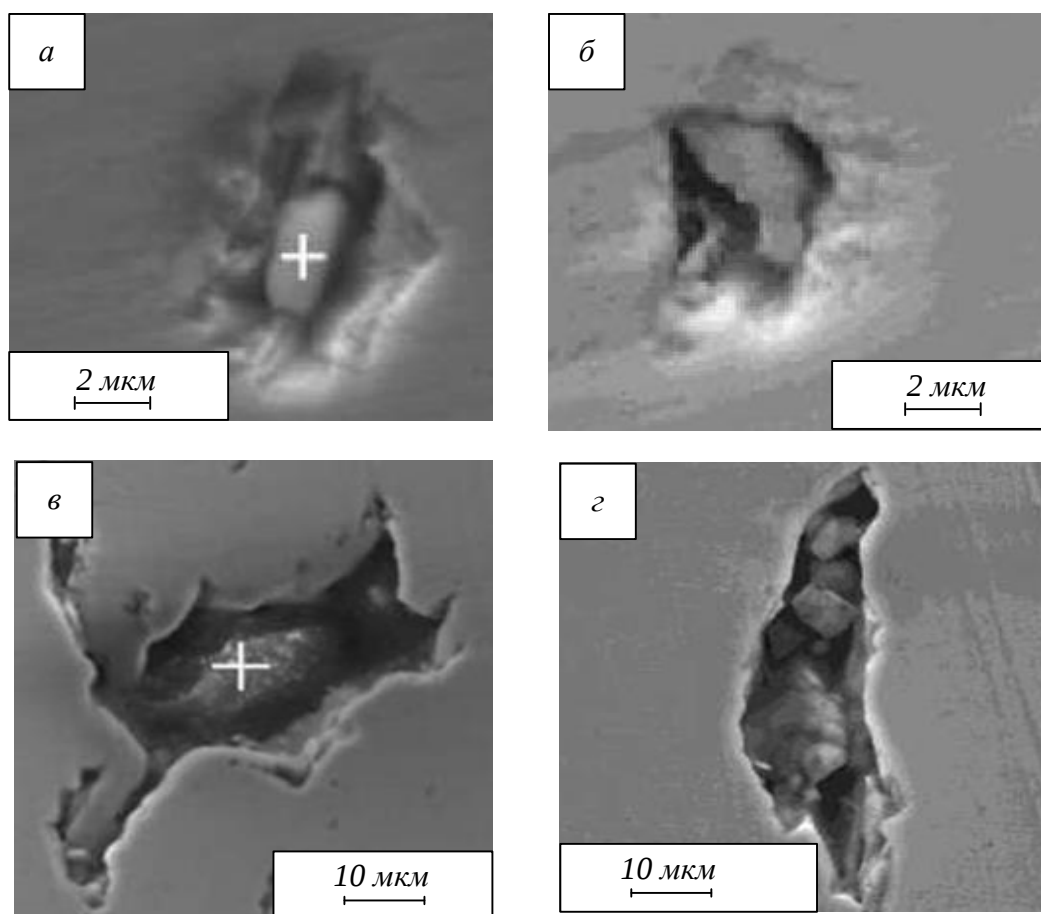


Рис. 5. Характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали марки Э76ХФ
 Fig. 5. Characteristic non-metallic inclusions in continuously cast billets of E76F grade rail steel

Обобщение полученных результатов позволяет констатировать, что для условий АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определяющее влияние на образование внутренних дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки в процессе ультразвукового контроля, оказывают окисленность стали на выпуске из печи и параметры ее продувки инертным газом (длительность и интенсивность продувки) в процессе обработки на агрегате ковш-печь. Регулируя указанные параметры, возможно, значительно снизить концентрацию окисдных, силикатных и сульфидных неметаллических включений в расплаве рельсовой стали, что обусловит уменьшение интенсивности образования внутренних дефектов в непрерывнолитых заготовках и готовых рельсах.

Выводы

На основании комплексных исследований природы металлургических дефектов рельсов из электростали производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определено, что на вероятность их образования наиболее значительное влияние оказывают окисленность рельсовой стали на выпуске из дуговой электропечи и параметры ее продувки инертным газом в процессе обработки на агрегате ковш-печь. Снижение окисленности рельсовой стали в совокупности с повышением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в ковше в рамках существующего интервала изменения указанных параметров приводит к значительному снижению загрязненности непрерывнолитых заготовок и рельсов окисдными, силикатными и сульфидными неметаллическими включениями и, тем самым, способствует уменьшению количества внутренних дефектов рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головатенко А.В., Коновалов А.Н., Полевой Е.В., Мамонтов М.М., Юнусов А.М. О влиянии условных дефектов, выявленных УЗК, на потребительские свойства рельсов // *Сталь*. 2019. № 7. С. 72–74.
2. Aglan H., Gan Y.X. Fatigue crack growth analysis of a premium rail steel // *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. No. 2. P. 389–397. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004872427903>
3. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcher D.I., Davis C.L., Kapoor A. Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation // *Wear*. 2008. Vol. 265. No. 9-10. P. 1332–1341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.027>
4. Larijani N., Brouzoulis J., Ekh M., Schilke M. The effect of anisotropy on crack propagation in pearlitic rail steel // *Wear*. 2014. Vol. 314. No. 1-2. P. 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.034>
5. Cen Y., Chen L., Dong R., Zhou Q. Effect of self-tempering on fatigue crack growth of heavy rail steel // *Materials Review*. 2021. Vol. 35. No. 12. P. 12136 – 12140. <http://dx.doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.014.023>
6. Cen Ya., Chen L., Chunjiao J., Wang H., Bao X. Fatigue crack growth behavior of eutectoid steel rail // *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2022. Vol. 37. No. 3. P. 507 – 512. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-022-2558-3>
7. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the Technical-Economic Indices of Rail-Steel Production by Sorting Scrap Based on its Content of Residual Elements // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 5-6. P. 500 – 503. <http://dx.doi.org/10.1007/s11015-014-9941-z>
8. Umanskii A.A., Boikov D.V., Kuznetsov E.P., Tverskoi A.B., Zakharova T.P. Electrosmelting of rail steel from directly reduced iron // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 7. P. 478–480. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091219070131>
9. Годик Л.А., Козырев Н.А., Гизатулин Р.А., Нохрина О.И., Бойков Д.В. Освоение технологии выплавки рельсовой стали низкотемпературной надежности с пониженным содержанием водорода. В кн.: Вестник Горно-Металлургической Секции Российской Академии Естественных Наук. Отделение Metallurgii: Сборник научных трудов. Вып. 27. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011. С. 81–84.
10. Pavlov V.V., Godik L.A., Kozyrev N.A., Tokarev A.V., Timmerman N.N. Ladle treatment of low-temperature rail steel // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 3. P. 231–233. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709120803011X>
11. Grigorovich K.V., Garber A.K., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P., Kostenko I.V. Optimizing the ladle treatment of rail steel at OAO NTMK // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 10. P. 858–863. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208100161>
12. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Добужская А.Б., Юнин Г.Н., Полевой Е.В., Бойков Д.В., Спирин С.А. Влияние модифицирования РЗМ на формирование неметаллических включений в высокоуглеродистых сталях // *Сталь*. 2016. № 11. С. 21–28.
13. Dementiev V.P., Negoda A.V., Kozyrev N.A., Peretyatko V.N. Slag-forming mixture for continuous casting of rail steel // *Steel in Translation*. 2002. Vol. 32. No. 6. P. 24–26.

14. Числавлев В.В., Неунывакина Д.Т., Фейлер С.В. Оптимизация процессов рафинирования рельсовой стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок. В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 109–112.
15. Числавлев В.В., Фейлер С.В. Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше методами физического моделирования. В кн.: Кузбасс: образование, наука, инновации. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2016. С. 483 – 485.
16. Golovatenko, A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012002. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012002>
17. Катунин А.И., Годик Л.А., Обшаров М.В., Козырев Н.А., Тиммерман Н.Н. Применение жидкого чугуна в дуговых электропечах // Металлург. 2000. № 6. С. 32.
18. Годик Л.А., Козырев Н.А., Данилов А.П., Захарова Т.П., Тиммерман Н.Н. Использование жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // Электromеталлургия. 2002. № 1. С.9–14.
19. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Sychev P.E. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron // Steel in Translation. 2001. Vol. 31. No. 1. P. 19–21.
20. Волков К.В., Кузнецов Е.П., Бойков Д.В., Сапаев Н.М., Захарова Т.П. Освоение производства рельсовой стали на модернизированной МНЛЗ № 1 ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 25–30.
21. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 32–38.
22. Юрьев А.Б., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Дорофеев В.В., Полевой Е.В. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // Сталь. 2016. № 11. С. 33–35.
23. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянцев М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 10. С. 704–714.
24. Kuznetsov I.S., Prakhov A.E., Umanskii A.A., Rubtsov Yu.T. Influence of technological factors on the surface quality of structural-steel billet // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 318–321. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208040141>
25. Жульев С.И., Гузенков С.А., Данилин В.В. Совместное влияние примесных элементов в высокочистой стали на конструкционную прочность металлоизделий // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 5. С. 48–50.

REFERENCES

1. Golovatenko A.V., Konovalov A.N., Polevoi E.V., Mamontov M.M., Yunusov A.M. On the Impact of Conditional Defects Detected by UZK on the Consumer Properties of Rails. *Stal'*. 2019, no. 7, pp.72–74. (In Russ.).
2. Aglan H., Gan Y.X. Fatigue crack growth analysis of a premium rail steel. *Journal of Materials Science*. 2001, vol. 36, no. 2, pp. 389–397. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004872427903>
3. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcher D.I., Davis C.L., Kapoor A. Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 9-10, pp. 1332–1341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.027>
4. Larijani N., Brouzoulis J., Ekh M., Schilke M. The effect of anisotropy on crack propagation in pearlitic rail steel. *Wear*. 2014, vol. 314, no. 1-2, pp. 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.034>
5. Cen Y., Chen L., Dong R., Zhou Q. Effect of self-tempering on fatigue crack growth of heavy rail steel. *Materials Review*. 2021, vol. 35, no. 12, pp. 12136–12140. <http://dx.doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.014.023>
6. Cen Ya., Chen L., Chunjiao J., Wang H., Bao X. Fatigue crack growth behavior of eutectoid steel rail. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2022, vol. 37, no. 3, pp. 507–512. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-022-2558-3>
7. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the Technical-Economic Indices of Rail-Steel Production by Sorting Scrap Based on its Content of Residual Elements. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6,

- pp. 500–503. <http://dx.doi.org/10.1007/s11015-014-9941-z>
8. Umanskii A.A., Boikov D.V., Kuznetsov E.P., Tverskoi A.B., Zakharova T.P. Electrosmelting of rail steel from directly reduced iron. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 7, pp. 478–480. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091219070131>
 9. Godik L.A., Kozyrev N.A., Gizatulin R.A., Nokhrina O.I., Boikov D.V. Mastering the technology of smelting low-temperature reliability rail steel with reduced hydrogen content. In: *Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Collection of scientific papers. Issue 27*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2011, pp. 81–84. (In Russ.).
 10. Pavlov V.V., Godik L.A., Kozyrev N.A., Tokarev A.V., Timmerman N.N. Ladle treatment of low-temperature rail steel. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 3, pp. 231–233. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709120803011X>
 11. Grigorovich K.V., Garber A.K., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P., Kostenko I.V. Optimizing the ladle treatment of rail steel at OAO NTMK. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 10, pp. 858–863. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208100161>
 12. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin S.A. The effect of REM modification on the formation of non-metallic inclusions in high-carbon steels. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 21–28. (In Russ.).
 13. Dementiev V.P., Negoda A.V., Kozyrev N.A., Peretyatko V.N. Slag-forming mixture for continuous casting of rail steel. *Steel in Translation*. 2002, vol. 32, no. 6, pp. 24–26.
 14. Chislavlev V.V., Neunyvakhina D.T., Feiler S.V. Optimization of rail steel refining processes in the intermediate ladle of the continuous casting machine. In: *Science and youth: problems, search, solutions*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2015, pp. 109–112. (In Russ.).
 15. Chislavlev V.V., Feiler S.V. Study of hydrodynamic processes in the intermediate bucket using physical modeling methods. In: *Kuzbass: education, science, innovation*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2016, pp. 483–485. (In Russ.).
 16. Golovatenko, A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 012002. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012002>
 17. Katunin A.I., Godik L.A., Obsharov M.V., Kozyrev N.A., Timmerman N.N. Application of liquid cast iron in arc electric furnaces. *Metallurg*. 2000, no.6, pp. 32. (In Russ.).
 18. Godik L.A., Kozyrev N.A., Danilov A.P., Zakharova T.P., Timmerman N.N. Use of molten iron in steel smelting in arc electric furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2002, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
 19. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Sychev P.E. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron. *Steel in Translation*. 2001, vol. 31, no. 1, pp. 19–21.
 20. Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Boikov D.V., Sapaev N.M., Zakharova T.P. Mastering the production of rail steel at the upgraded MNLS No. 1 ESPC of EVRAZ ZSMK OJSC. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014, no. 6 (1374), pp. 25–30. (In Russ.).
 21. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of a universal rail mill and mastering the technology of rail production using modern equipment in the rail workshop of EVRAZ ZSMK OJSC. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014, no. 6 (1374), pp. 32–38. (In Russ.).
 22. Yur'ev A.B., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Polevoi E.V. Development and implementation of the first in Russia technology for the production of differentiated-heat-reinforced rails using heat of rolling heating. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 33 – 35. (In Russ.).
 23. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and industrial development of the technology of differential thermal treatment of railway rails using heat of rolling heating. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 704 – 714. (In Russ.).
 24. Kuznetsov I.S., Prakhov A.E., Umanskii A.A., Rubtsov Yu.T. Influence of technological factors on the surface quality of structural-steel billet. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 318 – 321. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208040141>
 25. Zhuliev S.I., Guzenkov S.A., Danilin V.V. Joint effect of impurity elements in high-purity steel on structural strength of metal products. *Izvestiya. Ferrous metallurgy* 2004, no. 5, pp. 48 – 50. (In Russ.).

Сведения об авторах

Любовь Валерьевна Думова, соискатель кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: doumova@bk.ru

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

Александр Александрович Уманский, д.т.н., директор института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

Information about the authors

Lyubov' V. Dumova, candidate of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals, Siberian State Industrial University

E-mail: doumova@bk.ru

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University

E-mail: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.08.2023

После доработки 24.08.2023

Принята к публикации 25.08.2023

Received 10.08.2023

Revised 24.08.2023

Accepted 25.08.2023