

Оригинальная статья

УДК 669.017.16:669.018.294.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-46-56

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ РЕЛЬСОВ
РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА**

© 2023 г. О. В. Бессонова¹, Е. В. Полевой¹, Т. Н. Осколкова²

¹АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Увеличение осевых нагрузок и массы подвижного состава, характерных для современного тяжеловесного движения, а также существенное повышение скоростей движения пассажирских поездов увеличивают нагрузки на железнодорожный путь. Вместе с этим со стороны потребителей рельсовой продукции выдвигаются требования по увеличению сроков межремонтной наработки, повышению долговечности и надежности рельсов как основного и наиболее нагруженного элемента верхнего строения пути. Эксплуатационная стойкость рельсов в значительной степени определяется структурно-фазовым состоянием стали. Важной технической задачей является установление закономерностей формирования микроструктуры рельсов в зависимости от химического состава стали и влияния структуры на свойства готовой продукции. В результате проведенных исследований установлены связи между параметрами структуры и физико-механическими свойствами рельсов, а также между содержанием основных химических элементов в стали и межпластинчатым расстоянием перлита. Разработаны предложения по получению мелкодисперсной перлитной структуры, обеспечивающей наиболее высокие эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, твердость, дифференцированно термоупрочненные рельсы, микролегирование, микроструктура рельсов, параметры микроструктуры, межпластинчатое расстояние, диаметр зерна, величина перлитных колоний

Для цитирования: Бессонова О.В., Полевой Е.В., Осколкова Т.Н. Сравнительный анализ микроструктуры и свойств рельсов различного химического состава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(4(46)):46–56. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-46-56](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-46-56)

Original article

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES
OF RAILS WITH DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITION**

© 2023 O. V. Bessonova¹, E. V. Polevoi¹, T. N. Oskolkova²

¹JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant» (16 Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The increase in axial loads and the mass of rolling stock, typical for modern heavy haul traffic, as well as a significant increase in the speeds of passenger trains, increase the load on the railway track. At the same time, on the part of consumers of rail products, requirements are being put forward to increase the time of inter-repair work as well as the durability and reliability of rails as the main and most loaded element of the upper structure of the track. The operational stability of rails is largely determined by the structural and phase state of steel. It is important to establish the regularities of the formation of the microstructure of rails, which depends on the chemical composition of steel and the influence of the structure on the properties of finished products.

As a result of the conducted studies, the links between the structure parameters, the physical and mechanical properties of rails, the content of the main chemical elements in steel, and the interplate distance of perlite have been established. The authors proposed to obtain a finely dispersed perlite structure that provides the highest operational properties.

Keywords: chemical composition, mechanical properties, hardness, differentially heat-strengthened rails, microalloying, microstructure of rails, microstructure parameters, interplate distance, grain diameter, size of pearlite colonies

For citation: Bessonova O.V., Polevoi E.V., Oskolkova T.N. Comparative analysis of the microstructure and properties of rails with various chemical compositions. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(4(46)):46–56. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-46-56](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-46-56)

Введение

Для потребителей рельсовой продукции в современных условиях постоянного повышения эксплуатационных нагрузок наиболее важное значение приобретают такие факторы, как увеличение срока службы рельсов, снижение их удельной дефектности, сокращение затрат на их содержание. Все эти факторы зависят от эксплуатационной стойкости рельсов. К основным показателям эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов следует отнести износостойкость и сопротивление к образованию дефектов, контактной усталости (контактно-усталостную прочность), которые определяются структурой и физико-механическими свойствами рельсовой стали.

Возможности улучшения качества и повышения потребительских свойств рельсов, помимо повышения чистоты стали по загрязненности неметаллическими включениями, связаны с определением закономерностей и установлением взаимосвязи между структурой стали и свойствами рельсов (прочностью, пластичностью, твердостью, ударной вязкостью). Таким образом, одним из основных факторов, в значительной степени определяющим эксплуатационную стойкость рельсов, является структурно-фазовое состояние стали.

По результатам многочисленных исследований [1 – 8] выявлены основные закономерности влияния микроструктуры на эксплуатационную стойкость рельсов. В настоящее время в мире наиболее распространены рельсы из высокоуглеродистой стали, в которой в результате ускоренного охлаждения формируется структура дисперсной пластинчатой феррито-карбидной смеси (перлита), обеспечивающая высокие твердость, показатели прочностных и пластических свойств, ударной вязкости, трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости. С повышением дисперсности структуры указанные характеристики возрастают [1].

По мнению авторов работ [2 – 4] эксплуатационная стойкость рельсов напрямую связана с

их твердостью, поэтому развитие рельсового производства должно идти по пути повышения содержания углерода и обеспечения твердости на поверхности катания головки рельсов на уровне порядка 400 НВ. Следует отметить, что повышение твердости можно обеспечить не только увеличением содержания углерода, но также повышением содержания других легирующих элементов, стабилизирующих аустенит (например, хром). При этом за счет реализации различных механизмов упрочнения изменяется и механизм деструкции металла при эксплуатации. Увеличение в рельсовой стали содержания углерода благоприятно влияет на износостойкость, но отрицательно влияет на контактно-усталостную прочность, о чем свидетельствует анализ повреждаемости рельсов на линиях с тяжеловесным движением, представленный в работах [5, 6].

Авторы работ [7, 8] отмечают, что микролегирование карбонитридообразующими элементами существенно повышает дисперсность перлита и, соответственно, повышает эксплуатационную стойкость, износостойкость рельсов и сопротивление контактной усталости при качении. Следует отметить, что эффективность влияния карбидообразующих элементов на структуру стали зависит от технологии используемого нагрева под термическую обработку: например, для рельсов, термоупрочняемых методом объемной закалки в масле после печного нагрева, величина зерна ниже по сравнению с рельсами, дифференцированно термоупрочненными в воздушной среде непосредственно после прокатки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, при этом количество ванадия в этих сталях находится на одном уровне [9].

Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластинчатого расстояния в перлите, величина перлитных колоний, диаметр зерна, наличие избыточного феррита, а также состав и распределение карбидной фазы оказывают большое влияние на свойства рельсов. В работе [10] отмечено, что на стойкость рельсов

против образования контактно-усталостных дефектов влияет однородность микроструктуры: отсутствие участков бейнита и мартенсита.

В связи с изложенным для конкретных технологических режимов производства требуется разработка оптимального химического состава, а установление взаимосвязей между структурой, физико-механическими и потребительскими свойствами является актуально научной задачей.

В настоящей работе представлены результаты исследования структурно-фазового состояния стали и свойств железнодорожных рельсов типа Р65, отличающихся химическим составом металла и технологическими режимами производства.

Материал исследования

В качестве объекта исследования использовали рельсы типа Р65 текущего производства АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») эвтектоидного и заэвтектоидного составов, из сталей марок 76ХФ и 90ХАФ по ГОСТ Р 51685 – 2022 соответственно. Для стали каждой марки были отобраны и сгруппированы плавки, отличающиеся по содержанию углерода, хрома и ванадия. Содержание остальных химических элементов не имеет существенных различий между плавками, соответствует требованиям ГОСТ Р 51685 – 2022 и в настоящем анализе не представлено. Всего исследовано 25 плавов, условно маркированных как составы 1 – 4 (табл. 1).

В группе эвтектоидных сталей состава 1 содержание углерода находится ближе к нижнему пределу допустимых стандартом значений и составляет 0,73 %, содержание хрома составляет 0,39 %, содержание ванадия 0,06 %; рельсы состава 2 имеют несколько более высокое (на 0,03 %) содержание углерода и хрома (на 0,02 %), несколько более низкое содержание ванадия –

0,04 %, относительно состава 1. Остальные элементы находятся на сопоставимом уровне.

Сравнительный анализ химического состава металла рельсов заэвтектоидной группы показал, что металл состава 3 содержит примерно 0,86 % углерода, 0,29 % хрома, 0,09 % ванадия. Металл состава 4, по сравнению с составом 3, содержит на 0,06 % больше углерода и на 0,04 % хрома.

Известно, что межпластинчатое расстояние перлита зависит от температуры, при которой происходит перлитное превращение, то есть от степени переохлаждения аустенита, которая, в свою очередь, определяется химическим составом стали и скоростью охлаждения из аустенитного состояния. Карбидообразующие элементы значительно изменяют кинетику распада аустенита и, соответственно, вид диаграммы изотермического превращения, на которой появляется четкое разделение перлитного и бейнитного превращения и промежуточная область повышенной устойчивости аустенита [11]. В работах [12, 13] установлено, что при легировании хромом стали с перлитной структурой происходит твердорастворное упрочнение феррита, легирование цементита хромом с образованием соединения $(Fe,Cr)_3C$ и возможно образование карбидов хрома. Авторами работы [14] проведен анализ условий формирования перлитной структуры при термоупрочнении рельсов и установлена связь между суммарным содержанием углерода и хрома $((C + Cr), \%)$, температуры перлитного превращения и межпластинчатого расстояния перлита.

В настоящей работе с целью определения влияния суммарного содержания углерода и хрома на межпластинчатое расстояние перлита для исследуемых составов рельсового металла построена зависимость (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что данные параметры коррелируют между собой с достаточно высокой

Т а б л и ц а 1

Химический состав металла исследуемых рельсов
The chemical composition of the metal of the studied rails

Состав	Количество плавов	Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)			(C + Cr), %
			C	Cr	V	
1	3	76ХФ	0,73	0,39	0,06	1,12
2	9	76ХФ	0,77	0,41	0,04	1,18
3	12	90ХАФ	0,85	0,29	0,09	1,15
4	3	90ХАФ	0,92	0,33	0,09	1,25

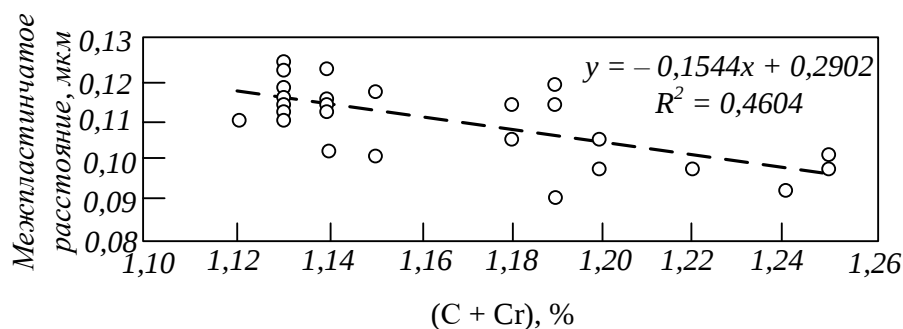


Рис. 1. Зависимость межпластинчатого расстояния от суммарного содержания в стали углерода и хрома
Fig. 1. Graph of the dependence of the interplate distance on the total content of carbon and chromium in steel

степенью достоверности. При этом увеличение суммарного содержания углерода и хрома приводит к уменьшению межпластинчатого расстояния в микроструктуре металла рельсов всех исследуемых составов, о чем свидетельствует наклон линий тренда. В соответствии с представленными данными установлено, что перлит в микроструктуре металла исследуемых рельсов с межпластинчатым расстоянием 0,09 – 0,10 мкм образуется при суммарном содержании углерода и хрома от 1,20 % и выше.

Сравнительный анализ структурно-фазового состояния рельсов

Микроструктуру металла рельсов исследовали на поперечных шлифах, изготовленных из зоны выкружки и из центральной части головки рельса после электрополировки и травления в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan MIRA 3. Исследуемая зона находилась на расстоянии 2 – 4 мм от поверхности катания головки рельса. Выбор указанного места исследования обусловлен реализацией в этом участке максимальных контактных напряжений от взаимодействия с колесами подвижного состава при эксплуатации, в связи с чем морфология, тип, однородность и прочие факторы микроструктуры оказывают большое влияние на сопротивление к

образованию дефектов эксплуатационного характера.

Колонии перлита регулярного строения наиболее часто наблюдаются в микроструктуре металла рельсов состава 2 (рис. 2, а), при этом на границах перлитных колоний, по краям ферритной сетки и внутри зерен структурно-свободного феррита встречаются коагулированные пластины цементита (рис. 2, б).

В микроструктуре металла рельсов состава 1 наблюдается перлит «волнистого» строения (рис. 3, а), структурно-свободный феррит в виде отдельных зерен и сетки встречается заметно чаще, что объясняется более низким содержанием углерода в стали (рис. 3, б). Наблюдаются участки грубых пластин цементита в свободном феррите.

В результате исследования микроструктуры металла рельсов составов 3 и 4 заэвтектоидной группы выявлено, что наряду с перлитом регулярного строения присутствует значительное количество деформированного перлита (рис. 4, 5).

Несмотря на повышенное содержание углерода в металле рельсов состава 4 заэвтектоидной группы, встречаются колонии перлита не только с ломаными, но и с «волнистыми» пластинами (рис. 5, а), а также участки с переплетением перлитных колоний (рис. 5, б).

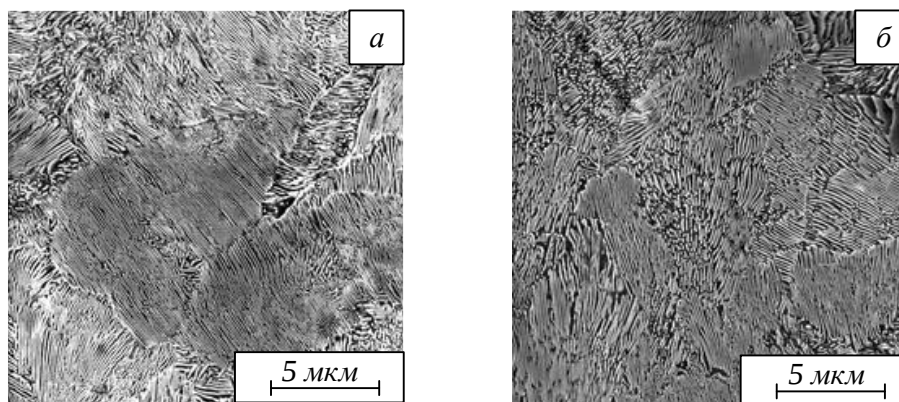


Рис. 2. Микроструктура металла рельсов эвтектоидной группы состава 2
Fig. 2. The microstructure of the metal rails of the eutectoid group of composition 2

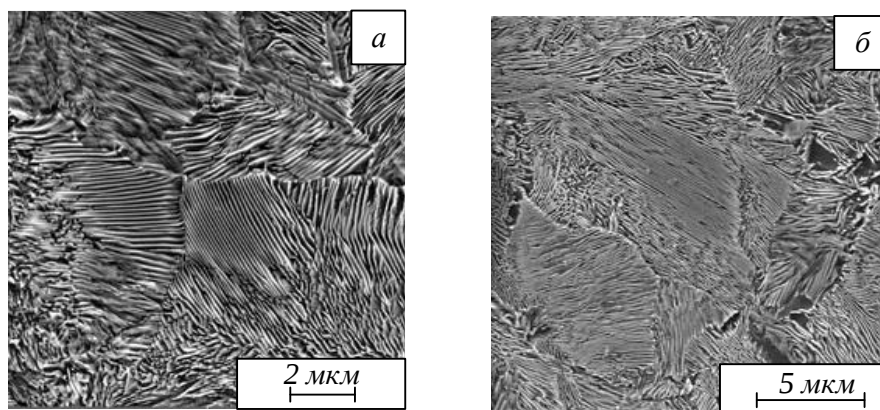


Рис. 3. Микроструктура металла рельсов эвтектоидной группы состава 1
Fig. 3. Microstructure of metal rails of the eutectoid group of composition 1

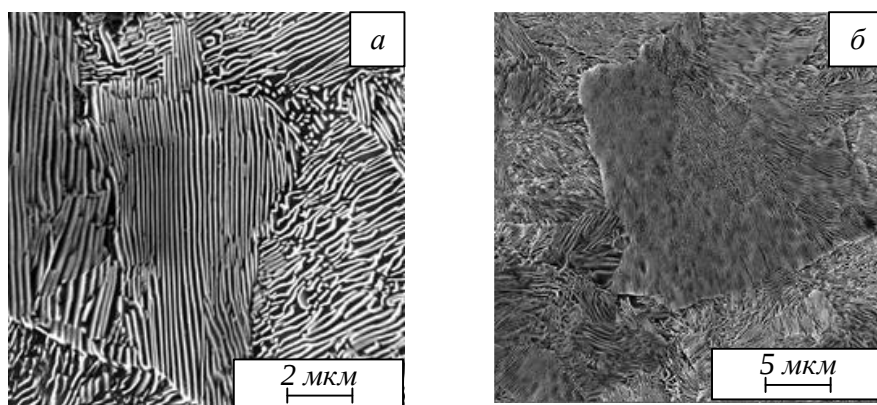


Рис. 4. Микроструктура металла рельсов заэвтектоидной группы состава 3
Fig. 4. Microstructure of metal rails of the transeutectoid group of composition 3

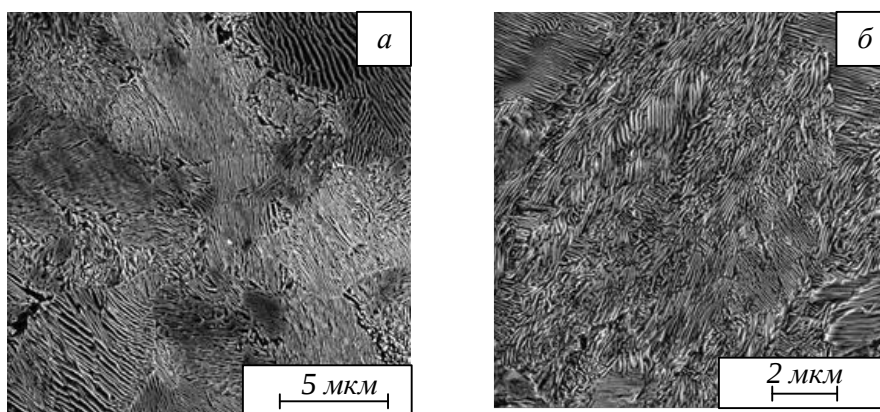


Рис. 5. Микроструктура металла рельсов заэвтектоидной группы состава 4
Fig. 5. The microstructure of the metal rails of the hypereutectoid group of composition 4

В микроструктуре металла рельсов состава 3 наиболее часто, по сравнению с рельсами состава 4, встречается структурно-свободный феррит в виде разорванной сетки или отдельных зерен, в которых наблюдаются карбидные пластины (рис. 6).

Количественный анализ параметров микроструктуры

Микроструктура рельсов, изготовленных из сталей перлитного класса в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК», может быть охарактеризована:

– средним диаметром действительного аустенитного зерна (D , мкм);

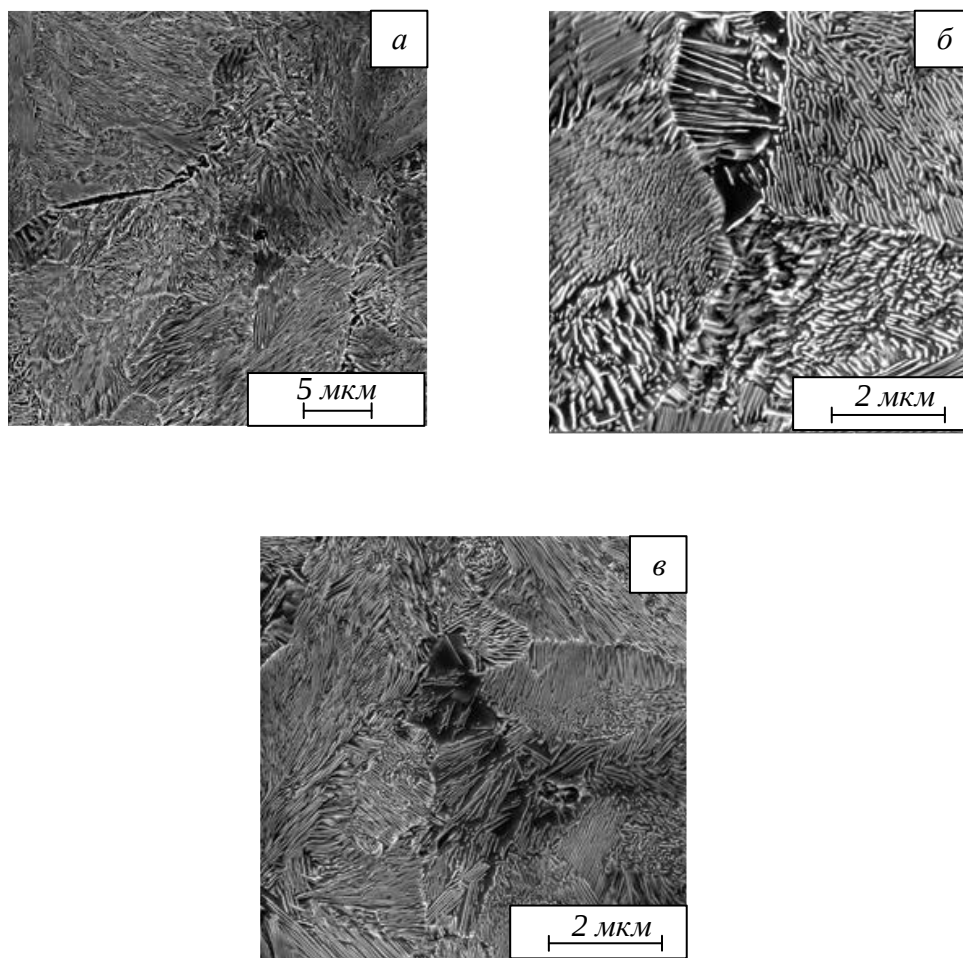


Рис. 6. Микроструктура металла рельсов заэвтектоидной группы состава 3
 Fig. 6. The microstructure of the metal rails of the hypereutectoid group of composition 3

- средней величиной перлитных колоний ($ВПК_{ср}$, мкм);
- средним межпластинчатым расстоянием (Δ , мкм);
- количеством структурно-свободного феррита.

Диаметр зерна в металле исследуемых рельсов определяли у поверхности выкружки по сетке феррита или цементита в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определение величины зерна».

Перлитная колония – совокупность параллельных или веерообразных пластин феррита и цементита. Рост перлитной колонии контролируется диффузионным перераспределением углерода в аустените параллельно границе перлитной колонии. Внутреннее строение перлитных колоний характеризуется межпластинчатым расстоянием. Важная характеристика стали, содержащей перлит, – размер перлитной колонии, которая при разрушении стали ведет себя как самостоятельное зерно. С уменьшением размера перлитной колонии ударная вязкость стали возрастает.

Рельсовая сталь после прокатки и термической обработки имеет перлитную структуру,

важным параметром которой является величина межпластинчатого расстояния (расстояние между серединами ближайших одноименных пластин феррита или цементита). В работах [15 – 20] показано, что межпластинчатое расстояние (среди прочих параметров микроструктуры) оказывает наибольшее влияние на стойкость металла к образованию дефектов контактной усталости. Для достижения оптимального соотношения уровней прочности и пластичности важно знать влияние степени дисперсности перлита на характер деформационного поведения его структурных составляющих и, соответственно, перлитной стали. Межпластинчатое расстояние перлита определяет уровень механических и служебных свойств высокоуглеродистой стали. В связи с этим оценка этого структурного параметра необходима при разработке и корректировке составов стали и режимов термической обработки, обеспечивающих получение требуемых показателей качества металлоизделий.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование микроструктуры металла дифференцированно термоупрочненных рельсов с прокатного нагрева. Результаты количествен-

Т а б л и ц а 2

Параметры микроструктуры
Microstructure parameters

Состав	Основные параметры микроструктуры			
	Межпластинчатое расстояние перлита, мкм	Величина перлитных колоний, мкм	Диаметр зерна, мкм	Номер зерна
1	0,113	6,31	20,97	9
2	0,107	6,05	22,37	8
3	0,113	5,97	18,04	9
4	0,098	4,43	19,41	9

ной оценки параметров микроструктуры исследуемых рельсов эвтектоидной и заэвтектоидной групп представлены в табл. 2.

Согласно представленным данным средние значения размеров величины перлитных колоний и диаметра зерна в микроструктуре металла всех исследуемых рельсов находятся на сопоставимом уровне в интервале значений 5,97 – 6,31 и 18,04 – 20,97 мкм, что соответствуют номеру зерна 9. Исключением являются более крупный диаметр зерна (8 номера) в металле рельса состава 2 (среднее значение составляет 22,37 мкм) и несколько пониженная средняя величина перлитных колоний в микроструктуре металла из заэвтектоидной стали состава 4 (соответствует значению 4,43 мкм).

Межпластинчатое расстояние в микроструктуре металла рельсов эвтектоидной группы исследуемых составов и заэвтектоидной группы состава 3 находятся на сопоставимом уровне и составляют 0,107 – 0,113 мкм. При этом металл рельсов состава 4 заэвтектоидной группы отличается наиболее дисперсной структурой, среднее значение межпластинчатого расстояния в которой составляет 0,098 мкм.

Механические свойства и твердость

Механические свойства и твердость на поверхности катания головки рельсов исследуемых составов 1 – 4 представлены в табл. 3.

Из приведенных данных следует, что по мере увеличения содержания углерода в сталях эвтектоидного (1 и 2) и заэвтектоидного (3 и 4) составов наблюдается увеличение прочностных свойств и твердости на поверхности катания головки. При этом пластические свойства внутри каждой из двух групп находятся на сопоставимом уровне и при увеличении содержания углерода снижаются незначительно.

Полученные результаты отражают не только зависимости изменения прочностных и пластических свойств от содержания углерода в рельсах исследуемых составов, но также влияние содержания углерода и хрома, суммарное значение которых должно быть выше 1,2 %, что способствует увеличению дисперсности структуры перлита (уменьшению межпластинчатого расстояния) и обеспечению оптимального сочетания прочностных и пластических характеристик (рис. 7, 8).

Наиболее чувствительными характеристиками к измельчению зерна являются ударная вязкость и относительное удлинение. Известно [21], что ударная вязкость характеризует сопротивление материалов локальным пластическим деформациям, которые сосредоточены в небольших объемах около концентраторов напряжения. Мелкое зерно уменьшает неоднородность распределения деформации в микрообъемах

Т а б л и ц а 3

Механические свойства и твердость
Mechanical properties and hardness

Состав	Механические свойства при растяжении				Ударная вязкость	Твердость на поверхности катания головки
	σ_T	σ_B	δ	ψ	KCU _{+20 °C}	
	Н/мм ²		%		Дж/см ²	
1	843	1267	13,0	40,0	42	372
2	876	1290	12,3	37,5	31	380
3	915	1360	10,8	25,3	24	399
4	1013	1443	10,0	28,0	26	415

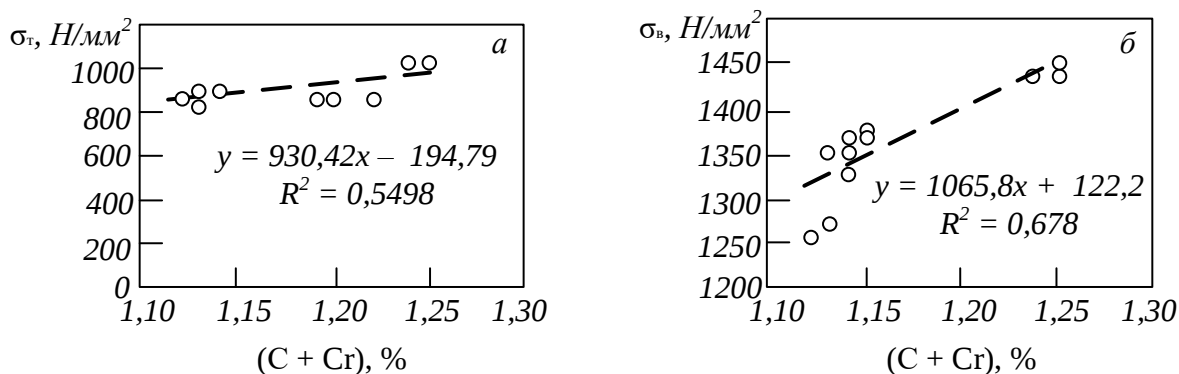


Рис. 7. Зависимости предела текучести (а) и временного сопротивления (б) от суммарного содержания углерода и хрома
Fig. 7. Dependences of yield strength (a) and time resistance (b) on the total carbon and chromium content

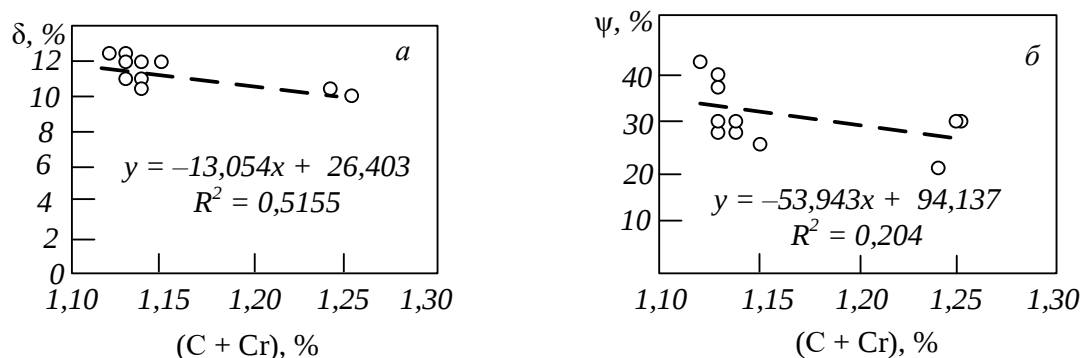


Рис. 8. Зависимости относительного удлинения (а) и относительного сужения (б) от суммарного содержания углерода и хрома
Fig. 8. Dependences of relative elongation (a) and relative contraction (b) on the total carbon and chromium content

структурных составляющих, что приводит к повышению ударной вязкости. На рис. 9, 10 представлены зависимости ударной вязкости и относительного удлинения от диаметра зерна в исследуемых составах сталей эвтектоидной и заэвтектоидной групп.

Указанные параметры (рис. 9, 10) коррелируют между собой с достаточно высокой степенью достоверности для сталей всех исследуемых составов. С уменьшением диаметра зерна наблюдается увеличение ударной вязкости и

относительного удлинения, о чем свидетельствует отрицательный наклон линий тренда. Таким образом, для сталей составов 1 и 2 при диаметре зерна 20,0 – 22,5 мкм возможно получить ударную вязкость около 30 – 40 Дж/см², относительное удлинение около 12 – 13 %, для составов 3 – 4 – ударная вязкость находится в интервале 24 – 33 Дж/см², а относительное удлинение составляет от 10,5 до 11,0 % при диаметре зерна 15 – 20 мкм.

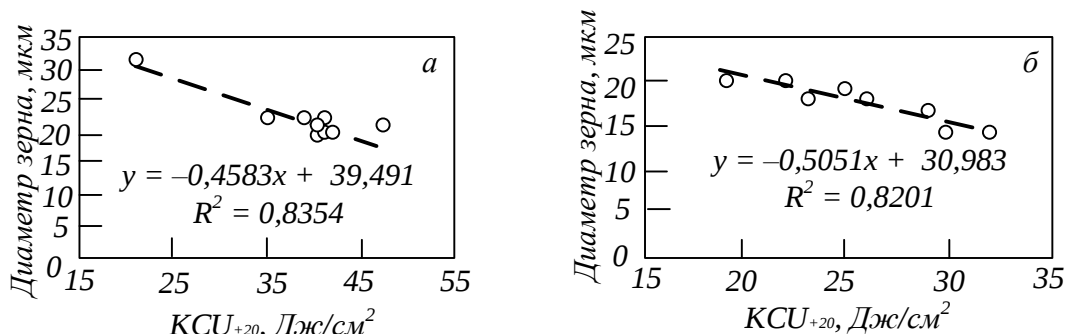


Рис. 9. Зависимости ударной вязкости от диаметра зерна:
а – стали состава 1 и 2; б – стали состава 3 и 4
Fig. 9. The dependence of the impact strength on the grain diameter:
а – steels of composition 1 and 2; б – steels of composition 3 and 4

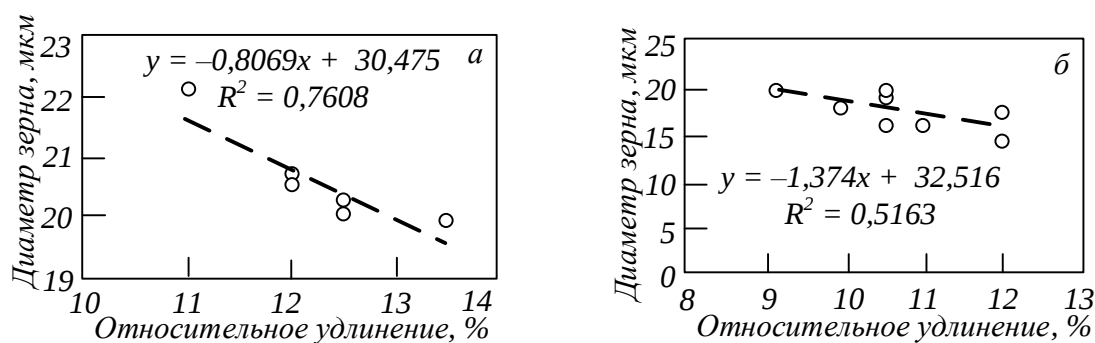


Рис. 10. Зависимости относительного удлинения от диаметра зерна:

а – стали составов 1 и 2; б – стали составов 3 и 4

Fig. 10. The dependence of the relative elongation on the grain diameter:

а – steels of composition 1 and 2; б – steels of composition 3 and 4

Выводы

Установление взаимосвязей между химическим составом, структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами рельсовой стали необходимо для прогнозирования эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов. Структурно-фазовое состояние рельсовых сталей определяется, главным образом, химическим составом, который оказывает влияние на дисперсность структуры. При суммарном содержании углерода и хрома от 1,2 % и выше межпластинчатое расстояние в микроструктуре металла исследуемых рельсов составляет 0,09 – 0,100 мкм и способствует обеспечению оптимального сочетания прочностных и пластических свойств рельсов.

Влияние величины зерна на ударную вязкость и относительное удлинение имеет обратную зависимость. При диаметре зерна размером 20,0 – 22,5 мкм (для сталей эвтектоидной группы) и 15 – 20 мкм (для сталей заэвтектоидной группы) возможно получение ударной вязкости в интервале 30 – 40 Дж/см², 24 – 33 Дж/см² и относительного удлинения 12 – 13 %, 10,5 – 11 % для сталей составов 1, 2 и 3, 4 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добужская А.Б., Галицын Г.А., Мухранов Н.В., Фомичев М.С., Белокурова Е.В., Беликов С.В. Исследование структурно-фазового превращения при охлаждении рельсовой стали. *Сталь*. 2015;(11):86–91.
2. Полевой Е.В., Добужская А.Б., Темлянцев М.В. Влияние скорости охлаждения на формирование структуры рельсовой стали, микролегированной ванадием и ниобием. *Машиностроение, материаловедение: Вестник ПНИПУ*. 2016;(4):7–20. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.4.01>
3. Masaharu U., Kenji M. Effects of carbon content and hardness on rolling contact fatigue resistance in heavily loaded pearlitic rail steels. *Wear*. 2020;444-445:203120. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203120>
4. Ивано Г., Кацуя И. Технологические и эксплуатационные характеристики рельсов с высоким содержанием углерода. В кн.: *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сборник научных трудов*. ОАО «УИМ». Екатеринбург, 2012:72–81.
5. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Темлянцев М.В. Новейшие разработки рельсовой продукции в АО «ЕВРАЗ ЗСМК». *Сталь*. 2019;7:55–58.
6. Павлов В.В., Годик Л.А., Корнева Л.В., Козырев Н.А., Гизатулин Р.А. Производство рельсов повышенной износостойкости. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007;(10):35–37.
7. Смирнов Л.А., Кушнарев А.В., Добужская А.Б., Киричков А.А., Белокурова Е.В. Стали транспортного назначения, микролегированные ванадием и азотом. *Сталь*. 2020;(6):56–63.
8. Arunim Ray. Microalloying with niobium in rail steels. *Materials Science and Technology*. 2017; 33(14):1584–1600. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1309111>
9. Полевой Е.В., Волков К.В., Кузнецов Е.П., Головатенко А.В., Атконова О.П., Юнусов А.М. Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». В кн.: *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая Комиссия» 25 – 27 октября 2013 г): Сборник научных докладов*. Екатеринбург: ОАО «УИМ». 2014:93–100.
10. Полевой Е.В., Добужская А.Б., Темлянцев М.В. Влияние скорости охлаждения на формирование структуры рельсовой стали, микролегированной ванадием и ниобием. *Машиностроение, материаловедение: Вестник ПНИПУ*. 2016;(4):7–20. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.4.01>

- ролегированной ванадием и ниобием. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2016;18(4):7–20. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.4.01>
11. Godefroid L. B., Souza A. T., Pinto M. A. Fracture toughness, fatigue crack resistance and wear resistance of two railroad steels. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9588–9597. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.092>
 12. Егорова Л.Ю. Влияние структурного состояния перлита на физико-механические и коррозионные свойства высокоуглеродистых сталей: автореф. дис. канд. техн. наук. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2014:23.
 13. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. *Перлит в углеродистых сталях*. Екатеринбург: УрО РАН, 2006:311.
 14. Новожилов И.С., Чередников В.А., Полевой Е.В., Рубцов В.Ю., Улегин К.А. Влияние микролегирования и горячей деформации на кинетику распада аустенита рельсовой стали. *Калибровочное бюро*. 2022;20:11–22.
 15. Изотов В.И., Поздняков В.А., Лукьяненко Е.В., Усанова О.Ю., Филиппов Г.А. Влияние дисперсности перлита на механические свойства, деформационное поведение и характер разрушения высокоуглеродистой стали. *Физика металлов и материаловедение*. 2007;103(8):549–560.
 16. Gray G.T., Thompson A.W., Williams J.C. Influence of microstructure on fatigue crack initiation in fully pearlitic steels. *Metallurgical Transactions A.V.* 1985;16(3):753–760.
 17. Колбасников Н.Г., Варгасов Н.Р., Зотов О.Г., Лукьянов А.А., Белозеров В.Л. Исследование эксплуатационной надежности железнодорожных рельсов, прокатанных по разным технологиям. *Сталь*. 2014;(12):76–83.
 18. Shur Ev.A., Bychkova N.Ya., Trushevsky S.M. Physical aspects of rolling contact fatigue of rail steels. *Wear*. 2005;258:1165–1171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.027>
 19. Чичко А.Н., Сачек О.А., Соболев В.Ф., Веденеев А.В. О новых математических методах анализа строения эвтектоидных колоний перлитных сталей. *Литье и металлургия*. 2012(4(68)):69–73.
 20. Добужская А.Б., Галицын Г.А., Юнин Г.Н., Полевой Е.В., Юнусов А.М. Исследование влияния химического состава, микроструктуры и механических свойств на износостойкость рельсовой стали. *Сталь*. 2020;(12):52–55.
 21. Кушнарев А.В., Сухов А.В., Петренко Ю.П., Филиппов Г.А. О вязкости разрушения колесной стали. *Вестник Магнитогорского Государственного Технического Университета им. Г.И. Носова*. 2006;(4(16)):87–92.

REFERENCES

1. Dobuzhskaya A.B., Galitsyn G.A., Mukhranov N.V., Fomichev M.S., Belokurova E.V., Belikov S.V. Research of structural-phase transformations during cooling of rail steel. *Steel*. 2015;11:86–91. (In Russ.).
2. Polevoi E.V., Dobuzhskaya A.B., Temlyantsev M.V. The effect of the cooling rate on the formation of the structure of rail steel microalloyed with vanadium and niobium. *Mashinostroenie, materialovedenie: Vestnik PNIPU*. 2016;4:7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.4.01>
3. Masaharu U., Kenji M. Effects of carbon content and hardness on rolling contact fatigue resistance in heavily loaded pearlitic rail steels. *Wear*. 2020;444-445:203120. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203120>
4. Ivano G., Katsuya I. Technological and operational characteristics of rails with a high carbon content. In: *Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners: A collection of scientific papers. JSC "UIM"*. Ekaterinburg, 2012:72–81. (In Russ.).
5. Polevoy E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. The latest developments of rail products on EVRAZ ZSMK JSC. *Steel*. 2019;7:55–58. (In Russ.).
6. Pavlov V.V., Godik L.A., Korneva L.V., Kozyrev N.A., Gizatulin R.A. Production of rails with increased wear resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007;(10):35–37. (In Russ.).
7. Smirnov L.A., Kushnarev A.V., Dobuzhskaya A.B., Kirichkov A.A., Belokurova E.V. Transport steels microalloyed with vanadium and nitrogen. *Stal'*. 2020;(6):56–63. (In Russ.).
8. Arunim Ray. Microalloying with niobium in rail steels. *Materials Science and Technology*. 2017; 33(14):1584–1600. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1309111>
9. Polevoi E.V., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M. Development of technology for the production of differentially heat-strengthened rails on JSC EVRAZ ZSMK. In: *Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners (based on the materials of the meeting of the non-profit partnership "Rail Commission" on October 25 - 27, 2013): Collection of*

- scientific reports. Yekaterinburg: JSC "UIM". 2014:93–100. (In Russ.).
10. Polevoy E.V., Dobuzhskaya A.B., Temlyantsev M.V. Influence of the cooling rate on the formation of the structure of rail steel microalloyed with vanadium and niobium. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2016;18(4):7–20.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.4.01>
 11. Godefroid L. B., Souza A. T., Pinto M. A. Fracture toughness, fatigue crack resistance and wear resistance of two railroad steels. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9588–9597.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.092>
 12. Egorova L.Yu. The influence of the structural state of perlite on the physico-mechanical and corrosion properties of high-carbon steels: Extended abstract of candidate's thesis. Yekaterinburg: IFM UrO RAS, 2014:23. (In Russ.).
 13. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. Perlite in carbon steels. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006:311. (In Russ.).
 14. Novozhilov I.S., Cherednikov V.A., Polevoi E.V., Rubtsov V.Yu., Ulegin K.A. The effect of micro-alloying and hot deformation on the kinetics of austenite decay of rail steel. *Kalibrovochnoe byuro*. 2022;20:11–22. (In Russ.).
 15. Izotov V.I., Pozdnyakov V.A., Luk'yanenko E.V., Usanova O.Yu., Filippov G.A. The influence of the dispersion of perlite on the mechanical properties, deformation behavior and the nature of destruction of high-carbon steel. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2007;103(8):549–560. (In Russ.).
 16. Gray G.T., Thompson A.W., Williams J.C. Influence of microstructure on fatigue crack initiation in fully pearlitic steels. *Metallurgical Transactions A*. 1985;16(3):753–760.
 17. Kolbasnikov N.G., Vargasov H.P., Zotov O.G., Lukyanov A.A., Belozarov V.L. Investigation of operational reliability of railway rails rolled using various technologies. *Steel*. 2014;(12):76–83. (In Russ.).
 18. Shur Ev.A., Bychkova N.Ya., Trushevsky S.M. Physical aspects of rolling contact fatigue of rail steels. *Wear*. 2005;258:1165–1171.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.027>
 19. Chichko A.N., Sachek O.A., Sobolev V.F., Vedenev A.V. On new mathematical methods for analyzing the structure of eutectoid colonies of pearlitic steels. *Casting and metallurgy*. 2012(4(68)):69–73. (In Russ.).
 20. Dobuzhskaya A.B., Galitsyn G.A., Yunin G.N., Polevoi E.V., Yunusov A.M. Investigation of the influence of chemical composition, microstructure and mechanical properties on the wear resistance of rail steel. *Stal'*. 2020;12:52–55. (In Russ.).
 21. Kushnarev A.V., Sukhov A.V., Petrenko Yu.P., Filippov G.A. On the fracture toughness of wheel steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova*. 2006;4(16):87–92. (In Russ.).

Сведения об авторах

Ольга Валерьевна Бессонова, главный специалист-металловед по электронной микроскопии и исследовательским работам, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Olga.Bessonova@evraz.com
ORCID: 0009-0002-2883-5766

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: oskolkova@kuz.ru
ORCID: 0000-0003-1310-1284

Information about the authors

Ol'ga V. Bessonova, chief specialist-metallologist in electron microscopy and research, JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant»
E-mail: Olga.Bessonova@evraz.com
ORCID: 0009-0002-2883-5766

Egor V. Polevoi, Cand. Sci. (Eng.), head of the research department, JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant»
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), professor of the department of ferrous metallurgy and chemical technology, Siberian State Industrial University
E-mail: oskolkova@kuz.ru
ORCID: 0000-0003-1310-1284

Поступила в редакцию 05.11.2023
После доработки 06.12.2023
Принята к публикации 11.12.2023

Received 05.11.2023
Revised 06.12.2023
Accepted 11.12.2023