



С. С. Черняк<sup>1</sup>, В. Л. Бройдо<sup>2</sup>, Л. В. Тужлилина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 21 ноября 2017 г.

## РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

**Аннотация.** Осуществление технической реконструкции железнодорожного транспорта, эффективное использование новых мощных локомотивов, ускорение движения поездов в большой мере зависят от качества рельсов. Современные железнодорожные рельсы работают в очень трудных условиях. Статическая нагрузка на ось локомотива или большегрузного вагона доходит до 27 т. Скорости движения товарных поездов на отдельных участках пути превышают 100 км/ч. При этом особое значение имеет качество рельсов, необходимое не только для обеспечения высокой грузонапряженности, большой скорости и безопасности движения, но и для удлинения срока службы их в пути.

Совместно специалистами ЕВРАЗ ЗСМК и ИрГУПС были проведены отработка состава стали, технологии изготовления износостойких рельсов для железных дорог МПС РФ и промышленные испытания на сложных участках пути. Для повышения качества рельсов и износостойкости необходимо улучшать химический состав и чистоту рельсового металла, а также совершенствовать технологию нагрева заготовок, прокатки, калибровку валков, термическую обработку и т. п. В данной статье представлен анализ отработки состава и параметров технологии изготовления рельсов из заэвтектоидной стали и приведены результаты испытаний опытных партий рельсов.

**Ключевые слова:** рельсовая сталь, химический состав, механические свойства, износостойкость, выплавка, очистка стали, неметаллические включения, непрерывная разливка стали, термическая обработка.

S. S. Chernyak<sup>1</sup>, V. L. Broido<sup>2</sup>, L. V. Tuzhilina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: November 21, 2017

## THE DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE WEAR RESISTANT RAILS MADE OF HYPEREUTECTOID STEEL

**Abstract.** Technical reconstruction of railway transport, the efficient use of new powerful locomotives, and accelerating the movement of trains to a large extent depend on the quality of rails. Modern rails operate under hardship conditions. The static load on the axle or heavy locomotive car reaches 27 m. The rail quality is crucial not only for ensuring the rates of freight train traffic on certain high traffic density, high speed and traffic safety, but also for the extension of their service life on the road.

During the cooperative work, the experts of Evraz ZSMK (United West Siberian Metallurgical Combine) and Irkutsk State Transport University conducted a testing of the composition of steel, wear-resistant rails manufacturing technology for the RF Ministry of Railways Railway road and industrial tests in arduous sections of the track. To improve the quality of the rails, it is necessary to improve the wear resistance, the chemical composition and purity of the rail metal. It is also necessary to improve the heating technology for billets and the rolling, as well as the calibrating of rolls, heat treatment, etc. For R65 rails in curved sections of the track, especially with curves of a small radius ( $R < 450$  m), the guaranteed number of the transported cargo is not more than 150 million tons. The nature of the defects results in the deflection of rails from the track at different straight and curved portions of small radius. The main defects in the areas of small radius curves are crushing and abrasion of rails. This problem is solved by the production of hypereutectoid steel rails and bainitic steel rails.

This article provides an analysis of the workout of the composition and the production technology parameters for rails made of the hypereutectoid steel, and also the results of tests on the experimental batches of rails.

**Keywords:** rail steel, a chemical composition, mechanical properties, an abrasion resistance, smelting, steel cleaning, non-metallic inclusions, a continuous steel casting, heat treatment.

### Введение

До последнего времени для рельсов Р65 криволинейных участков пути, особенно с кривыми малого радиуса ( $R < 450$  м), гарантированное количество перевезенного груза составляло не более 150 млн т.

Характер дефектов, служащих причиной изъятия рельсов с пути, различен на участках пря-

молинейных и кривых малого радиуса. Основными дефектами на участках кривых малого радиуса являются смятие и истирание рельсов.

Можно добиться значительного повышения стойкости рельса против истирания и смятия повышением прочностных характеристик рельсовой стали. Эта задача разрешается практически путем

производства заэвтектоидных рельсов и рельсов из бейнитной стали.

Для ВСЖД на ЕВРАЗ ЗСМК для проведения промышленных испытаний было отгружено около 300 т рельсов опытных партий и в условиях участка пути Иркутск - Слюдянка, характеризующегося большим количеством кривых малого радиуса, проведены испытания, показавшие более высокую стойкость к боковому износу.

На основании требований ГОСТ Р 51685-2000 для марки стали Э85Ф и ТУ 0921-125-01124328-2001 для марки стали Э83Ф была разработана технология выплавки и разливки на МНЛ заэвтектоидной рельсовой стали.

Проведены 4 рельсовых кампании выплавки, разливки и прокатки рельсов Р65К, всего за период отработки отгружено железным дорогам МПС РФ около 5 тыс. т рельсов Р65К из заэвтектоидной стали, в т. ч. на ВСЖД отгружено 2 сцепы износостойких рельсов для проведения промышленных испытаний [2-4].

Выплавку опытного рельсового металла производили согласно требованиям технологической инструкции ТИ 68-ЭС-004-2003, разработанной и утвержденной специалистами ЗСМК и согласованной с инспекцией МПС РФ по приемке рельсовой продукции.

Выплавка осуществлялась одношлаковым процессом с отсечкой шлака в стонных дуговых печах с основной футеровкой, водоохлаждаемыми стенами и сводом, оснащенными газокислородными горелками, кислородными фурмами и манипуляторами.

Раскисление металла производилось в ковше во время выпуска присадкой силикомарганца, ферросилиция, феррованадия. Также металл в ковше обработан твердой шлакообразующей смесью, состоящей из извести 1300-1500 кг и плавикового шпата 300-400 кг, а также силикокальцием в количестве 400 кг.

После выпуска плавки производилась обязательная предварительная двухминутная продувка стали на УПСА (установка продувки стали азотом). После продувки стали в ковше перед отправкой на МНЛЗ (машина непрерывной разливки стали) температура металла составляла 1530-1545 °С [5].

Разливка металла производилась на 4 ручьевых МНЛЗ с сечением кристаллизатора 330×300 мм сериями по 4-5 плавов.

Температурно-скоростной режим разливки:  
менее 1475 °С - 0,60 м/мин;  
1475-1485 °С - 0,55 м/мин;  
более 1485 °С - до 1495 °С, 0,50 м/мин.

Порезку непрерывнолитых заготовок на мерные длины производили с учетом получения в рельсобалочном цехе из одной заготовки двух 25-м рельсов.

После порезки НЛЗ (непрерывнолитые заготовки) охлаждаются в коробах замедленного охлаждения до температуры 300-400 °С, производится их осмотр с целью отбраковки заготовок с дефектами. Отгрузка НЛЗ в прокатный цех осуществляется вагонами открытыми или вагонами-термосами (в зимнее время).

Нагрев НЛЗ под прокатку и термическую обработку рельсов производили в соответствии с действующими технологическими инструкциями.

Выход рельсов первого сорта в длине 25 м по качеству поверхности составил около 94,0 %.

Анализ химического состава рельсовых плавов двух кампаний представлен в табл. 1, третьей рельсовой кампании - в табл. 2.

В металле второй кампании среднее содержание ванадия - 0,054 %, азота - 0,0107 %.

Среднее значение содержания алюминия в металле трёх кампаний практически одинаковое и составляет 0,007-0,008 %.

Концентрация ванадия и азота, полученная в металле плавов первой кампании, находится в пределах, предусмотренных для рельсов низкотемпературной надежности по ТУ 0921-118-01124328-2001 непрерывной разливки стали), температура металла составляла 1530-1545 °С.

При отработке технологии нитридного упрочнения рельсовой стали установлено, что оптимальное сочетание ванадия и азота, составляющее соответственно 0,08-0,10 % и 0,013-0,017 %, обеспечивает повышение сопротивления рельсов хрупкому разрушению за счет образования дисперсных частиц нитридов алюминия и карбонитридов ванадия, приводящих к значительному измельчению аустенитного зерна. Это особенно важно для рельсов из стали с заэвтектоидным содержанием углерода, характеризующихся сравнительно низким запасом вязкости [5-7].

Оценку загрязнённости металла неметаллическими включениями проводили по ГОСТ Р 51685-2013 на шлифах, вырезанных из шести горячекатаных рельсов, отобранных от каждой партии.

Длина строчек глобулярных включений в рельсах первой партии не превышает нормы, предусмотренной по ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов общего назначения, в рельсах второй партии превышает допустимые пределы и составляет 0,83 и 1,29 мм.

## Химический состав стали плавков двух кампаний

№ кам- пании	Шифр плавки	Массовая доля химических элементов , %										
		C	Mn	Si	P	8	Cr	Ni	Cu	Al	V	N
I	Б633	0,86	0,92	0,35	0,016	0,007	0,09	0,07	0,11	0,006	0,08	0,012
	Н634	0,84	0,86	0,34	0,014	0,007	0,09	0,06	0,10	0,011	0,06	0,013
	Н635	0,84	0,90	0,34	0,012	0,006	0,06	0,06	0,09	0,007	0,07	0,014
	Н636	0,83	0,83	0,37	0,011	0,009	0,11	0,08	0,12	0,009	0,07	0,012
	Б637	0,85	0,82	0,35	0,012	0,005	0,06	0,05	0,09	0,006	0,07	0,016
	Б638	0,85	0,90	0,35	0,015	0,007	0,11	0,08	0,12	0,006	0,07	0,014
	Б639	0,81	0,80	0,34	0,014	0,010	0,06	0,06	0,11	0,008	0,07	0,012
	Б640	0,84	0,87	0,33	0,009	0,006	0,06	0,05	0,09	0,010	0,07	0,013
	Б641	0,86	0,88	0,37	0,009	0,008	0,04	0,05	0,08	0,008	0,07	0,012
	Н642	0,87	0,88	0,35	0,015	0,007	0,11	0,07	0,13	0,007	0,07	0,013
	Н643	0,85	0,85	0,40	0,012	0,011	0,06	0,06	0,11	0,007	0,07	0,013
	Н644	0,87	0,83	0,39	0,012	0,007	0,05	0,05	0,10	0,006	0,08	0,017
	Н645	0,87	0,84	0,33	0,012	0,007	0,11	0,09	0,11	0,007	0,07	-
	Б646	0,85	0,84	0,36	0,011	0,005	0,05	0,05	0,08	0,011	0,07	-
	Б647	0,86	0,88	0,36	0,018	0,008	0,09	0,07	0,15	0,008	0,07	0,012
	Б648	0,84	0,85	0,33	0,017	0,007	0,05	0,05	0,08	0,007	0,08	0,014
<b>Min</b>		<b>0,81</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,009</b>	<b>0,005</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>	<b>0,006</b>	<b>0,06</b>	<b>0,012</b>
<b>Max</b>		<b>0,87</b>	<b>0,92</b>	<b>0,40</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>	<b>0,15</b>	<b>0,011</b>	<b>0,08</b>	<b>0,017</b>
<b>Среднее</b>		<b>0,849</b>	<b>0,859</b>	<b>0,354</b>	<b>0,0131</b>	<b>0,0073</b>	<b>0,075</b>	<b>0,063</b>	<b>0,104</b>	<b>0,0077</b>	<b>0,071</b>	<b>0,0134</b>
II	Б1998	0,87	0,92	0,32	0,014	0,010	0,09	0,06	0,11	0,007	0,05	0,010
	Н1999	0,84	0,82	0,35	0,011	0,012	0,05	0,06	0,11	0,008	0,05	0,012
	Н2000	0,84	0,96	0,36	0,016	0,007	0,04	0,04	0,07	0,008	0,06	0,010
	Н2001	0,84	0,90	0,37	0,011	0,006	0,06	0,05	0,10	0,008	0,05	0,012
	Б2002	0,84	0,88	0,35	0,013	0,009	0,05	0,06	0,10	0,007	0,05	0,009
	Н2003	0,85	0,90	0,36	0,016	0,010	0,10	0,07	0,12	0,008	0,05	0,010
	Н2004	0,85	0,81	0,31	0,011	0,006	0,05	0,05	0,09	0,008	0,05	0,012
	Б2005	0,83	0,81	0,33	0,011	0,007	0,06	0,06	0,11	0,007	0,05	0,009
	Н2006	0,85	0,85	0,34	0,015	0,009	0,06	0,06	0,13	0,008	0,06	0,013
	Н2007	0,82	0,79	0,29	0,017	0,008	0,08	0,06	0,15	0,006	0,06	0,011
	Н2008	0,85	0,77	0,30	0,016	0,007	0,09	0,06	0,11	0,006	0,05	0,011
	Б2009	0,87	0,81	0,34	0,017	0,014	0,07	0,07	0,12	0,009	0,06	0,009
	Б2010	0,84	0,84	0,40	0,020	0,010	0,06	0,07	0,12	0,008	0,06	0,011
	Н2011	0,88	0,85	0,36	0,011	0,007	0,06	0,06	0,10	0,008	0,05	0,011
	Б2012	0,85	0,89	0,33	0,016	0,006	0,05	0,05	0,09	0,008	0,05	0,010
Б2013	0,84	0,88	0,31	0,016	0,008	0,06	0,04	0,10	0,006	0,06	0,012	
<b>Min</b>		<b>0,82</b>	<b>0,77</b>	<b>0,29</b>	<b>0,011</b>	<b>0,006</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,07</b>	<b>0,006</b>	<b>0,05</b>	<b>0,009</b>
<b>Max</b>		<b>0,87</b>	<b>0,96</b>	<b>0,40</b>	<b>0,020</b>	<b>0,014</b>	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>	<b>0,15</b>	<b>0,008</b>	<b>0,06</b>	<b>0,013</b>
<b>Среднее</b>		<b>0,848</b>	<b>0,855</b>	<b>0,334</b>	<b>0,0144</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,064</b>	<b>0,057</b>	<b>0,10</b>	<b>0,0075</b>	<b>0,054</b>	<b>0,0107</b>
Требования		0,83	0,75	0,25			≤0,20	≤0,15	≤0,20		0,08	0,010
ГОСТ Р 51685- для Э90АФ		-	-	-			суммарная доля не более 0,40			≤0,04	-	-
		0,95	1,25	0,60	≤0,020	≤0,025					0,15	0,020
Требования		0,78	0,75	0,25			≤ 0,015 каждого				0,03	
ТУ 02921-125-2001 для Э83Ф		-	-	-			суммарная доля не более 0,040			≤0,020	-	-
		0,88	1,05	0,45	≤0,020	≤0,015					0,15	

Таблица 2

**Химический состав стали плавов третьей кампании**

Номер плавки	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Mn	Si	P	S	Al	V	Cr	Ni	Cu
H2382	0,87	0,94	0,38	0,011	0,006	0,008	0,06	0,05	0,05	0,08
H2383	0,85	0,95	0,33	0,018	0,009	0,006	0,05	0,13	0,11	0,12
H2384	0,85	0,84	0,32	0,010	0,006	0,007	0,07	0,05	0,06	0,09
H2385	0,85	0,88	0,34	0,017	0,011	0,006	0,05	0,09	0,07	0,11
B2386	0,87	0,85	0,34	0,013	0,009	0,008	0,05	0,10	0,06	0,12
B2387	0,84	0,84	0,30	0,016	0,009	0,007	0,05	0,10	0,08	0,13
B2388	0,84	0,82	0,32	0,015	0,009	0,006	0,05	0,06	0,05	0,09
H2389	0,85	0,94	0,37	0,016	0,008	0,008	0,05	0,10	0,11	0,14
B2390	0,83	0,82	0,33	0,011	0,008	0,008	0,05	0,08	0,07	0,10
H2391	0,85	0,88	0,37	0,013	0,008	0,006	0,05	0,09	0,09	0,15
H2392	0,87	0,88	0,31	0,016	0,008	0,006	0,05	0,07	0,06	0,11
H2393	0,85	0,94	0,34	0,012	0,007	0,008	0,05	0,06	0,06	0,09
H2394	0,86	0,90	0,38	0,014	0,009	0,010	0,05	0,07	0,06	0,11
B2395	0,86	0,86	0,33	0,012	0,009	0,006	0,05	0,07	0,06	0,11
H2396	0,84	0,92	0,32	0,015	0,011	0,006	0,05	0,07	0,06	0,10
<b>Min</b>	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	<b>0,30</b>	<b>0,010</b>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>
<b>Max</b>	<b>0,87</b>	<b>0,95</b>	<b>0,38</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,07</b>	<b>0,13</b>	<b>0,11</b>	<b>0,15</b>
<b>Среднее</b>	<b>0,852</b>	<b>0,884</b>	<b>0,340</b>	<b>0,014</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,007</b>	<b>0,052</b>	<b>0,080</b>	<b>0,070</b>	<b>0,11</b>

Сопоставление результатов оценки загрязненности стали неметаллическими включениями позволяет сделать вывод, что металл рельсов первой партии более чистый по сравнению со второй.

Оценку макроструктуры проводили в соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 на пробах, отобранных от горячекатаных рельсов.

Макроструктура рельсов соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013 (табл. 1). Качество макроструктуры рельсов первой партии ниже по сравнению с рельсами второй партии. В макроструктуре рельсов двух плавов первой кампании и одного рельса третьей кампании химическая и точечная неоднородность соответствует предельно допустимой. Пораженность металла остальных плавов этими дефектами находится в допустимых пределах, и даже в подавляющем большинстве проконтролированных рельсов точечная неоднородность отсутствует. При этом в рельсах, соответствующих хвостовой части непрерывнолитой заготовки, степень развития указанных дефектов была больше, чем в рельсах, соответствующих головной части заготовки.

В макроструктуре рельсов второй партии в отличие от первой точечная неоднородность пол-

ностью отсутствует. Ликвационные полосы в макроструктуре рельсов отсутствуют.

Травление поперечных темплетов, отобранных от объемно закаленных рельсов, показало структурную однородность всего поперечного сечения, что видно по одинаковой травимости всех элементов профиля рельса. Темнотравящийся ореол с поверхности катания головки, наблюдающийся иногда на обычных объемно закаленных рельсах, на заэвтектонидных рельсах отсутствует.

**Механические свойства**

Для определения механических свойств в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 от контрольных объемнозакаленных рельсов всех плавов отобрали пробы. Дополнительно проводили испытания на ударную вязкость при минус 60 °С. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Из данных таблицы видно, что объемно закаленные заэвтектонидные рельсы по механическим свойствам при растяжении, ударной вязкости, твердости на поверхности катания и по сечению удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ОТ370ИК и требованиям ТУ 0921-125-01124328-2002 для стали Э83Ф.



Т а б л и ц а 3

## Механические свойства рельсов

№ партии	№ плавки	Твердость рельса, НВ						σ <sub>T</sub>	σ <sub>B</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	КCU при температуре			
		Головка			Подошва							МПа	%	+20 °С	-60 °С
		ПКГ	10 мм	22 мм	шейка	1	2							Дж/см <sup>2</sup>	
														13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
I	Б633	375	375	352	363	375	363	990 960	1360 1360	10 10	44 44	34 31	18 20		
	Н634	401	375	352	363	375	375	940 900	1360 1320	15 11	43 41	41 42	22 20		
	Н635	375	375	352	375	375	375	101 990	1370 1340	11 11	40 41	38 25	13 23		
	Н636	388	388	363	363	375	375	101 103	1390 1400	10 12	40 40	33 33	22 16		
	Б637	388	388	375	352	363	363	106 106	1422 1420	11 11	39 40	30 33	26 25		
	Б638	388	388	363	388	375	388	990 103	1380 1420	12 10	41 40	37 37	18 21		
	Б639	363	363	341	352	363	363	990 103	1340 1380	11 11	44 41	28 30	19 41		
	Б640	363	375	352	363	363	363	990 103	1380 13	11 11	41 40	38 29	20 22		
	Б641	388	388	363	388	375	375	1040 103	1420 1400	11 10	40 40	32 32	20 21		
	Н642	388	375	352	388	388	388	990 1010	1400 1420	12 11	39 42	39 33	20 19		
	Н643	375	375	352	363	375	375	960 990	1340 1380	12 10	41 36	27 29	10 31		
	Н644	401	388	363	363	388	388	1010 1010	1410 1390	10 13	36 41	36 34	25 26		
	Н645	401	388	363	375	375	375	950 990	1410 1420	14 12	43 35	35 33	24 16		
	Н646	388	388	363	363	363	375	970 940	1360 1360	12 11	43 41	35 36	20 24		
	Б647	388	388	352	363	375	388	1010 960	1380 1370	11 13	42 41	34 37	14 22		
	Б648	388	388	363	375	375	375	990 990	1360 1380	12 13	39 39	26 37	14 22		
<b>Min</b>		<b>363</b>	<b>363</b>	<b>341</b>	<b>363</b>	<b>363</b>	<b>363</b>	<b>90</b>	<b>132</b>	<b>10</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>10</b>		
<b>Max</b>		<b>401</b>	<b>388</b>	<b>363</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>106</b>	<b>142</b>	<b>15</b>	<b>44</b>	<b>42</b>	<b>41</b>		
<b>Среднее</b>		<b>384,9</b>	<b>388,2</b>	<b>357,6</b>	<b>368,6</b>	<b>373,6</b>	<b>375,3</b>	<b>99,5</b>	<b>138,2</b>	<b>11,4</b>	<b>40,5</b>	<b>33,8</b>	<b>26</b>		
	Б1998	388	388	363	375	388	375	102	143	12	36	27	16		
								98	140	11	38	37	10		



II	Б1999	401	388	363	375	375	375	950 990	1380 1400	10 10	33 36	39 38	09 10
	Н2000	375	375	363	363	375	375	990 990	1380 1380	11 8	28 23	36 31	2,0 21
	Н2001	388	388	363	388	375	375	990 1010	1410 1390	11 11	37 38	36 31	26 20
	Б2002	401	388	363	363	388	388	980 960	1400 1380	10 9	40 40	38 30	14 14
	Н2003	401	388	363	375	388	388	1020 990	1430 1410	10 10	39 39	27 40	10 15
	Н2004	388	375	352	363	375	375	1040 1040	1400 1400	10 10	36 36	38 29	16 21
	Н2005	388	388	363	352	375	375	990 1050	1380 1430	11 11	39 35	38 35	17 18
	Н2006	388	388	363	375	375	363	940 990	1360 1390	10 10	31 27	30 33	24 21
	Н2007	388	375	352	375	375	375	980 990	1360 1380	10 8	32 25	35 20	20 17
	Н2008	388	388	363	363	388	388	990 990	1380 1410	10 11	35 36	33 40	21 16
	Б2009	401	388	363	388	375	388	990 990	1410 1410	11 10	39 40	33 33	17 11
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Б2010	401	401	375	375	388	375	1060 1010	1450 1390	9 9	40 40	31 36	27 22
	Б2011	415	388	363	363	388	388	990 990	1400 1380	9 9	36 31	34 37	28 18
Б2012	401	401	375	375	388	388	970 990	1410 1430	11 11	36 37	36 37	19 20	
Б2013	401	388	375	363	375	375	980 990	1360 1380	10 10	40 39	32 41	14 11	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
<b>Min</b>		<b>363</b>	<b>375</b>	<b>352</b>	<b>363</b>	<b>375</b>	<b>375</b>	<b>940</b>	<b>1360</b>	<b>8</b>	<b>23</b>	<b>27</b>	<b>9</b>
<b>Max</b>		<b>415</b>	<b>401</b>	<b>375</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>1150</b>	<b>1450</b>	<b>12</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>28</b>
<b>Среднее</b>		<b>394,6</b>	<b>387,2</b>	<b>363,9</b>	<b>363,9</b>	<b>380,7</b>	<b>379,1</b>	<b>996</b>	<b>1396</b>	<b>10,1</b>	<b>35,5</b>	<b>34</b>	<b>17</b>
	Н2382	388	401	375	388	388	388	990	1410	10	29	38 32	
	Н2383	388	388	375	375	388	388					40 36	
	Н2385	401	401	375	375	388	388					30 31	
	Б2386	388	388	375	375	388	388					36 36	
	Б2387	388	388	363	375	388	388					31 37	
	Б2388	388	388	363	375	388	388					37 38	
	Н2389	401	401	375	363	388	388					28 35	
	Б2390	388	388	363	363	388	388					30 40	
	Н2391	388	401	375	375	388	388					41 38	
	Н2392	388	388	363	375	388	388					35 27	
Н2393	388	388	363	375	375	375					31 41		

	H2394	388	388	363	375	388	388					38 32	
	B2395	388	388	363	388	388	388					25 30	
	H2396	401	388	363	388	388	388					2,6 2,7	
	<b>Min</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>363</b>	<b>363</b>	<b>375</b>	<b>375</b>					<b>2,5</b>	
	<b>Max</b>	<b>401</b>	<b>401</b>	<b>375</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>					<b>4,1</b>	
	<b>Среднее</b>	<b>390,6</b>	<b>391,5</b>	<b>368,6</b>	<b>376,0</b>	<b>388,0</b>	<b>388,0</b>					<b>3,36</b>	
<b>Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ОТЗ70ИК</b>	370-409	≥ 363	≥ 352	не более 388				≥ 870	≥ 1280	≥ 8,0	≥ 20	≥ 15	-
<b>Требования ТУ 0921-125-01124328-2001 для Э83Ф</b>	≥ 363	≥ 352	≥ 341	не более 401				Не менее					
								90	130	7	26	2,0	1,5

Результаты механических испытаний показывают, что рельсы из заэвтектоидной стали имеют существенное преимущество перед рельсами из стали Э76Ф. Заэвтектоидные рельсы обладают значительно более высоким уровнем твердости (ср.  $HV \geq 390,0$ ) и прочности (ср.  $\sigma_t = 995,5$ , ср.  $\sigma_{св} = 1389$  МПа), хорошей пластичностью (ср.  $\delta = 10,8$ , ср.  $\psi = 38$  %) и удовлетворительной ударной вязкостью при комнатной температуре (ср.  $KCU = 34$  Дж/см<sup>2</sup>) и минус 60 °С (ср.  $KCU_{-60\text{ °С}} = 21,5$  Дж/см<sup>2</sup>).

Более высокие значения твердости и прочности заэвтектоидной стали обусловлены высоким содержанием углерода, который, как известно, уменьшает скорость перлитного превращения, что приводит при закалке к образованию более дисперсной структуры [7, 9].

Рельсы двух партий, показавшие практически одинаковый уровень прочности и твердости, различаются между собой по уровню ударной вязкости и пластичности.

Рельсы первой партии имеют более высокую ударную вязкость при минус 60 °С (ср.  $KCU_{-60\text{ °С}} = 26$  Дж/см<sup>2</sup>). Частотное распределение их ударной вязкости показало максимальное число наблюдений в интервале значений 17-20 и 21-24 Дж/см<sup>2</sup>. При этом интервалу 9-12 Дж/см<sup>2</sup> соответствует наименьшее число наблюдений в отличие от рельсов второй партии.

При испытании рельсов второй партии мак-

симальное число ударных образцов показали ударную вязкость при минус 60 °С в пределах 13-20 Дж/см<sup>2</sup>. При этом количество выпадов по этой характеристике (при норме  $KCU_{-60\text{ °С}} > 15$  Дж/см<sup>2</sup>) было в два раза больше, чем на рельсах первой партии.

Характеристики пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) рельсов первой партии также несколько выше, чем рельсов второй партии. Относительное удлинение рельсов первой партии колеблется в пределах от 10 до 15 %, а рельсов второй партии – 8-12 %. Относительное сужение рельсов первой партии составило 35-44 % против 23-40 % рельсов второй партии.

Более высокий уровень ударной вязкости и пластичности рельсов первой партии по сравнению с рельсами второй партии при практически одинаковой их прочности и твердости обусловлен большим количеством ванадия и азота в стали рельсов первой партии, которые при введении в раскисленную алюминием рельсовую сталь обеспечивают измельчение аустенитного зерна за счет образования дисперсных карбонитридов и нитридов ванадия.

Степенью измельчения аустенитного зерна и определяется сопротивление металла хрупкому разрушению.

#### **Испытания на копровую прочность и остаточные напряжения**

Копровые испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013

при температуре минус 60 °С и высоте подъема груза 4,2 м на пробах, отобранных от всех контрольных объемно закаленных рельсов.

Остаточные напряжения определяли на одном рельсе от каждой партии методом разрезки шейки рельсовой пробы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013.

Результат копровых испытаний показали, что все контрольные рельсы первой партии выдержали испытания без разрушения. Стрела прогиба их составила 8,5–10 мм.

Рельсы четырех плавок второй партии первичные испытания не выдержали. Повторные испытания эти рельсы выдержали без разрушения. Стрела прогиба проб второй партии имеет более узкий интервал по сравнению с первой партией и составляет 8,5-9 мм.

Анализ результатов копровых испытаний показывает, что первая партия рельсов по сравнению со второй имеет более высокое сопротивление металла при разрушении.

Результаты замеров показали, что величины расхождения паза на пробах опытных партий рельсов составляют соответственно 1,1 и 1,7 мм и находятся в пределах допустимого значения 2,5 мм по ГОСТ Р 51685 для рельсов категории ОТЗ70ИК.

Малая величина расхождения паза пробы рельсов первой партии свидетельствует о сравнительно низком уровне остаточных напряжений, что связано, возможно, с закалкой этих рельсов по оптимально выбранному режиму (температура 800 - 810 °С).

#### Микроструктура

Металлографическое исследование проводили на шлифах, вырезанных из головки, шейки и подошвы контрольных нетермообработанных и объемнозакаленных рельсов всех плавок двух партий.

Конечную полировку шлифов производили электролитически в хлорно-уксусном растворе (95 % уксусной кислоты и 5 % хлорной кислоты), травление – в спиртовом (4 %) растворе азотной кислоты.

Результаты металлографического исследования показали, что рельсы после термической обработки имеют по всему сечению практически однородную структуру – сорбит закалки.

Однако в отдельных рельсах как первой, так и второй партии в структуре шейки в зоне обратной ликвации имеются участки ферритной сетки (рис. 1). Избыточная цементитная фаза наблюдается в зоне прямой ликвации углерода в шейке рельсов (рис. 2). Структурно-свободный цементит оценивали при увеличении  $\times 500$  по шкале № 4 ГОСТ 801-78. В рельсах четырех плавок первой партии и шести плавок второй партии цементитная сетка оценивается баллом 3 (рис. 2).

При исследовании не установлено зависимости количества цементитной фазы от содержания углерода в стали. Образование цементита в шейке связано с ликвационными процессами.

Изучение микроструктуры показало, что структурно-свободный цементит имеет неодинаковое распределение по границе аустенитного зерна и определяется в основном его величиной. Точечные выделения цементита наблюдаются в мелкозернистой структуре (рис. 3).

Величину природного зерна рельсов опытных партий определяли методом окисления при температуре 850 °С и выдержке 3 часа и оценивали по ГОСТ 5639-82.

В металле рельсов первой партии аустенитное зерно более мелкое (балл 9-8, рис. 4), чем в рельсах второй партии (балл 8, рис. 5).

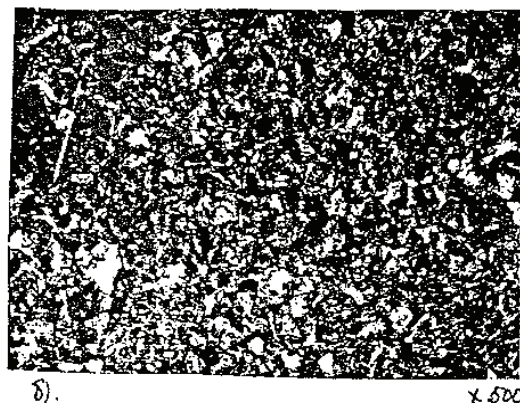
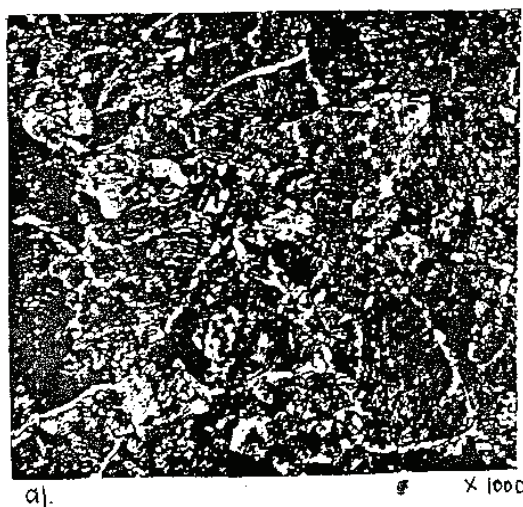


Рис. 1. Микроструктура шейки рельса





Рис. 2. Избыточная фаза цементита в шейке рельса

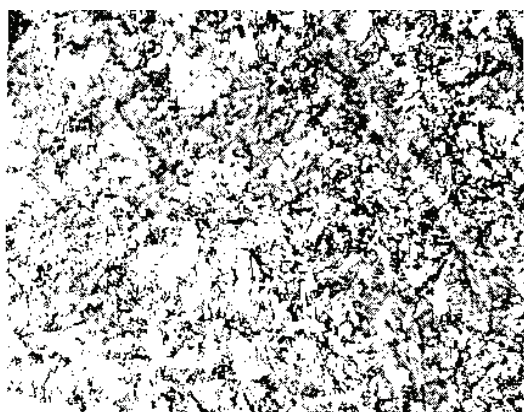


Рис. 3. Точечные выделения цементита

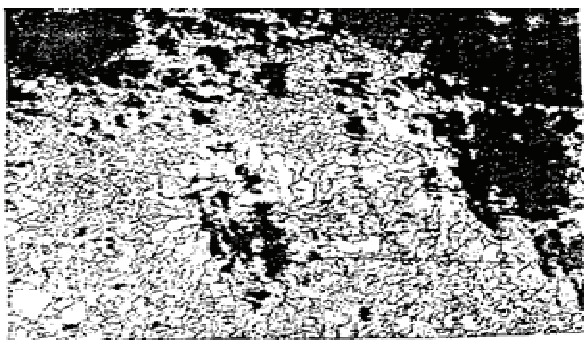


Рис.4. Аустенит, балл зерна 9-8 1-й партии

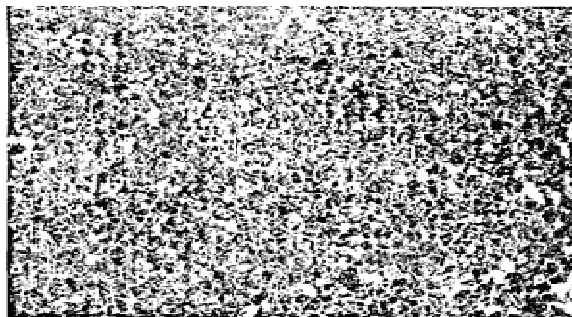


Рис.5. Аустенит, балл зерна 8 2-й партии

Механические свойства и твердость рельсов двух партий, несмотря на одинаковые условия закалки, несколько различаются, что связано с разной величиной зерна аустенита. За счет более крупного зерна в структуре рельсов второй партии образуется более дисперсная структура, о чем свидетельствует более высокий уровень их прочности и твердости. Мелкозернистая структура металла обеспечила на рельсах первой партии более высокий уровень ударной вязкости и пластичности.

#### Заключение

1. Две опытные партии заэвтектоидных рельсов Р65К, изготовленные из электростали, отлитой на МНЛЗ, по химическому составу соответствуют стали Э85Ф по ГОСТ Р 51685-2013 и Э83Ф по ТУ 0921-125-01124328-2001. В металле рельсов первой партии содержание ванадия и азота выше, чем в рельсах второй партии.

2. Металлургическое качество рельсов первой партии выше, чем рельсов второй партии. Металл рельсов первой партии чище по строчечным хрупкообразующим сложным оксидам.

3. Выход рельсов I сорта по качеству поверхности первой и второй партии соответственно составил 94,3 и 94,6 %.

4. Макроструктура заэвтектоидных рельсов удовлетворительная и соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013.

5. Объемно закаленные заэвтектоидные рельсы по механическим свойствам при растяжении, ударной вязкости, твердости на поверхности: катания и по сечению удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ОТ370ИК и требованиям ТУ 0921-125-01124328-2002 для стали Э83Ф.

6. Опытные рельсы из заэвтектоидной стали имеют существенное преимущество перед рельсами из стали Э76Ф. Они обладают значительно более высоким уровнем твердости (ср.  $HV \geq 390,0$ ) и прочности.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безопасность России. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера / В.А. Акимов, В.А. Алексеев и др. М. : Знание, 2014. 856 с.
2. Железнодорожные рельсы для Сибири / В.П. Демьенъев, Л.В. Корнева и др. Иркутск, Изд-во ИрГУПС, 2010. 320 с.
3. Черняк С.С. Железнодорожный путь Восточной Сибири. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2003. 424 с.
4. Козырев Н.А., Демьенъев В.П. Производство железнодорожных рельсов из электростали Новокузнецк, 2000. 123 с.
5. Производство рельсов из электростали / Л.А. Годик и др. // Электротехнология. 2000. № 7. С. 47.
6. Качество железнодорожных рельсов из непрерывнолитой стали, выплавленной в электропечи / В.В. Могильный и др. // Сталь. 1997. № 8. С. 53–55.
7. Козырев Н.А., Яковлев П.Ю., Козырева О.А. Прогнозирование твердости и механических свойств рельсовой стали Э76В // Изв. вузов. Черная металлургия. 1999. № 8. С. 37–39.
8. Пат. 2291218 Рос. Федерация, МПК С22С 38/24. Рельсовая сталь / Корнева Л.Е., Черняк С. С. и др.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщ. № 2005117855/02; заявл. 09.06.05, опубл. 10.01.07, Бюл. №1. 8 с.
9. Пат. 2224044 Российская Федерация, МПК7 С22 С38/46. Сталь / Ворожичев В.И., Черняк С.С. и др. ; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. № ; заявл. 25.01.02, опубл. 20.02.04, Бюл. №5. 6 с.
10. Хоменко А.П., С.С. Черняк, Бройдо В.Л. Разработка технологии электропечной выплавки легированной ванадием рельсовой стали и качество рельсов // Изв. Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 66–76.

## REFERENCES

1. Akimov V.A., Alekseenko V.A. et al. Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh Sibiri i Severa [Security of Russia. Safety of railway transport in the conditions of Siberia and the North]. Moscow: Znanie Publ., 2014, 856 p.
2. Dement'ev V.P., Korneva L.V. et al. Zheleznodorozhnye rel'sy dlya Sibiri [Railway rails for Siberia]. Irkutsk: ISTU Publ., 2010, 320 p.
3. Chernyak S.S. Zheleznodorozhnyi put' Vostochnoi Sibiri [The railway of Eastern Siberia]. Irkutsk: ISTU Publ., 2003, 424 p.
4. Kozyrev N.A., Dement'ev V.P. Proizvodstvo zheleznodorozhnykh rel'sov iz elektrostali [Production of railway rails from electric steel]. Novokuznetsk, 2000, 123 p.
5. Godik L.A. et al. Proizvodstvo rel'sov iz elektrostali [Production of rails from electric steel]. Elektrometallurgiya [Electrical Metallurgy], 2000, No. 7, pp. 47.
6. Mogil'nyi V.V. et al. Kachestvo zheleznodorozhnykh rel'sov iz nepreryvnoilitoi stali, vyplavlennoi v elektropechi [Quality of railway rails from continuous steel smelted in electric furnaces]. Stal' [Steel], 1997, No. 8, pp. 53–55.
7. Kozyrev N.A., Yakovlev P.Yu., Kozyreva O.A. Prognozirovanie tverdsti i mekhanicheskikh svoistv rel'sovoi stali E76V [Prediction of Hardness and Mechanical Properties of E76B Rail Steel]. Izv. vuzov. Chernaya Metallurgiya [Izvestiya - Ferrous Metallurgy], 1999, No. 8, pp. 37–39.
8. Korneva L.E., Chernyak S. S. et al. Rel'sovaya stal' [Rail steel]. Patent RF 2291218, MPK S22S 38/24. Patent applicant and holder is Irkutsk State Transport University. No. 2005117855/02; applied Jun 09 2005, publ. Jan. 10 2007, Bull. No.1, 8 p.
9. Vorozhishchev V.I., Chernyak S.S. et al. Stal' [Steel]. Patent RF 2224044, MPK7 S22 S38/46. Patent applicant and holder is Irkutsk State Transport University. No. ; applied Jan 25, 2002, publ. Feb 20, 2004, Bull. No.5, 6 p.
10. Khomenko A.P., S.S. Chernyak, Broido V.L. Razrabotka tekhnologii elektropechnoi vyplavki legirovannoi vanadiem rel'sovoi stali i kachestvo rel'sov [Development of technology for electric furnace melting of vanadium-alloyed rail steel and the quality of rails]. Izv. Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies], 2016, No. 3 (27), pp. 66–76.

## Информация об авторах

*Черняк Саул Самуилович* - д. т. н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

*Бройдо Владимир Львович* - к. т. н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и материалы», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: bvladimir@istu.edu

*Тужилина Лариса Викторовна* – к. т. н., доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tujilina\_lv@irgups.ru

## Для цитирования

Черняк С. С. Разработка состава и технологии изготовления износостойких рельсов из заэвтектоидной стали / С. С. Черняк, В. Л. Бройдо, Л. В. Тужилина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 197–206. — DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).197-206.

## Authors

*Saul Samuilovich Chernyak* – Doctor of Engineering Science, Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk

*Vladimir L'vovich Broido* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the Subdepartment of Machine-Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: bvladimir@istu.edu,

*Larisa Viktorovna Tuzhilina* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the Subdepartment of Railway Track and Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tujilina\_lv@irgups.ru

## For citation

Chernyak S. S., Broido V. L., Tuzhilina L. V. Razrabotka sostava i tekhnologii izgotovleniya iznosostoikikh rel'sov iz zaevtektoidnoi stali [The development of the composition and manufacturing technology of the wear resistant rails made of hypereutectoid steel]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No. 4, pp. 197–206. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).197-206.