

УДК 621.785

## РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ПРОКАТНОГО НАГРЕВА

*Полевой Е.В.<sup>1</sup>, начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела  
рельсовой прокатки (Egor.Polevoj@evraz.com)*

*Юнин Г.Н.<sup>1</sup>, заместитель управляющего директора по технологии рельсового  
проката (Gennady.Yunin@evraz.com)*

*Темлянец М.В.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, проректор по научной работе  
и инновациям (uchebn\_otdel@sibsiu.ru)*

<sup>1</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»  
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)  
<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Представлены результаты исследований, выполненных в ходе разработки и промышленного освоения технологии дифференцированной термической обработки воздухом железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева. Работа выполнена в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» во время реконструкции рельсового производства. Исследовано влияние химического состава сталей, режимов их пластической деформации и термической обработки на положение точек полиморфного превращения; построены термокинетические диаграммы сталей опытных химических составов. Исследованы скорости охлаждения по сечению головки рельсов в зависимости от параметров термической обработки. Определены рациональный химический состав и режимы термической обработки. Проведены эксперименты по термической обработке проб рельсов непосредственно после прокатки. По результатам теоретических и лабораторных данных разработаны рекомендации для промышленного внедрения технологии дифференцированной закалки. Проведенные промышленные испытания показали высокое качество рельсовой продукции, соответствующее требованиям нормативно-технической документации.

**Ключевые слова:** рельсы, термическая обработка, микроструктура, механические свойства, дифференцированная термическая обработка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-704-714

В настоящее время на долю железных дорог в мире приходится до 85 % грузооборота и более 50 % пассажирских перевозок [1]. Развернутая длина главных путей ОАО «РЖД» является одной из самых протяженных в мире и составляет более 124 тыс. км [2]. При этом на путях железных дорог уложено по разным оценкам примерно 21 – 24 млн. т рельсов, а их стоимость в общем объеме работ по капитальному ремонту пути составляет порядка 40 % [3]. Поэтому разработка способов повышения качества рельсов имеет особенно важное значение.

Термическая обработка рельсов является одним из наиболее эффективных способов повышения их служебных свойств. Эксплуатационная стойкость термоупрочненных рельсов увеличивается в 1,5 раза [4, 5], а затраты по текущему содержанию пути уменьшаются на 35 % [6] относительно нетермоупрочненных рельсов. До недавнего времени на отечественных предприятиях для термического упрочнения рельсов использовали технологию объемной закалки в мас-

ле, которая была разработана в 60-х годах прошлого века и, несмотря на ряд недостатков, позволила на тот момент занять лидирующие позиции в производстве рельсов [7, 8]. В настоящее время наибольшее распространение получили современные методы термической обработки рельсов, лишенные недостатков объемной закалки. К общим чертам современных линий по термической обработке рельсов можно отнести следующие [9, 10]:

- использование пожаробезопасных и экологически чистых закалочных сред (воздуха, водовоздушной смеси, водных растворов полимеров) взамен канцерогенного легковоспламеняющегося масла;
- производство длинномерных рельсов, обусловленное развитием высокоскоростного движения и стремлением к уменьшению количества сварных стыков;
- повышение твердости и прочности рельсов (в том числе за счет применения легирующих элементов);
- получение в результате термической обработки дифференцированных по сечению свойств, обус-

ловленных различными скоростями охлаждения элементов профиля (головки, шейки, подошвы) рельса;

– снижение в результате дифференцированной заковки внутренних остаточных напряжений, которые, как известно [11, 12], могут значительно уменьшать в условиях циклических знакопеременных нагрузок их циклическую долговечность, трещиностойкость и живучесть.

В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в процессе разработки технологии дифференцированной термической обработки воздухом железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева при реконструкции рельсового производства на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК), включающей отказ от объемной заковки с повторного нагрева.

Выбор воздуха в качестве закалочной среды обусловлен его высокой стабильностью, контролируемостью, технологичностью, экологичностью, безопасностью [13 – 15].

Разработку технологии термической обработки проводили в несколько этапов, использовали сталь Э76ХФ. Углеродистые стали перлитного класса традиционно [15, 16] используют для производства рельсов, при этом более низкая охлаждающая способность воздуха потребовала дополнительного легирования аустенит-стабилизирующими элементами (марганцем, хромом), а стремление сдержать аустенитное зерно, более крупное после прокатки относительно повторного печного нагрева [17], потребовало исследования влияния микролегирования карбидообразующими элементами (ванадием, ниобием).

### Оптимизация химического состава рельсовой стали для заковки воздухом

На первом этапе были исследованы стали четырех перспективных химических составов с различными (в пределах марочного состава по ГОСТ Р 51685 – 2013) содержаниями марганца, хрома, углерода, кремния и

ванадия; дополнительно стали двух химических составов подвергали микролегированию ниобием.

Выплавку сталей опытных химических составов проводили в дуговой электропечи ДСП-100И7 емкостью 100 т и разливали на МНЛЗ. Химический состав опытного металла по результатам ковшевого анализа представлен в табл. 1.

По одной непрерывнолитой заготовке от каждой плавки прокатали на рельсы типа Р65 по действующей технологии. После прокатки от каждого рельса в нетермоупрочненном состоянии отобрали образцы для построения термокинетических диаграмм с использованием закалочного-деформационного дилатометра ВАНР DIL 805 A/D<sup>1</sup>. На дилатометре образцы после нагрева со скоростью 10 °С/с деформировали по одно- и двухступенчатой схемам (рис. 1), имитирующими обжатие в черновой и чистовой клетях при прокатке, и охлаждали от температуры примерно 950 °С со скоростью 1 – 20 °С/с.

Анализ результатов показал, что в случае двухступенчатой деформации для сталей всех химических составов значительно расширяется температурный диапазон перлитного превращения, что объясняется измельчением зерна. Для комплексно легированного ванадием и ниобием металла плавок О51 и О54 эффект от деформации выражается более явно: температурный интервал перлитного превращения увеличивается в три раза (рис. 2).

Исследование микроструктуры образцов опытного металла показало, что наиболее однородной микроструктурой перлита в диапазоне скоростей охлаждения 1 – 3 °С/с обладает металл плавки О76 (рис. 3, а). Металл остальных плавок при охлаждении со скоростью 3 °С/с содержит локальные (1 – 3 %) участки бейнита (рис. 3, б). С увеличением скорости охлаждения металла количество недопустимых для рельсового металла структур мартенсита и бейнита возрастает (рис. 3, в).

Известно [18, 19], что наличие локальных участков мартенсита и бейнита негативно отражается на эксплуатационной стойкости рельсов. Таким образом, на первом этапе в результате исследований установлено,

Таблица 1

### Химический состав исследуемого металла

Table 1. Chemical composition of the investigated metal

Номер	Плавка	Содержание элемента, % (по массе)											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	Nb	N
1	О54	0,75	0,83	0,55	0,012	0,008	0,42	0,08	0,14	0,003	0,04	0,060	0,013
2	О51	0,79	1,09	0,43	0,016	0,009	0,57	0,07	0,13	0,003	0,04	0,035	0,015
3	О76	0,79	0,78	0,55	0,014	0,015	0,46	0,08	0,14	0,002	0,07	–	0,011
4	О74	0,76	0,87	0,32	0,017	0,005	0,56	0,07	0,12	0,003	0,07	–	0,015

<sup>1</sup> Работа по построению термокинетических диаграмм выполнена на базе НИТУ «МИСиС» при участии Р. Кавалла, И.С. Новожилова, М.Г. Хомутова, В.А. Трусова.

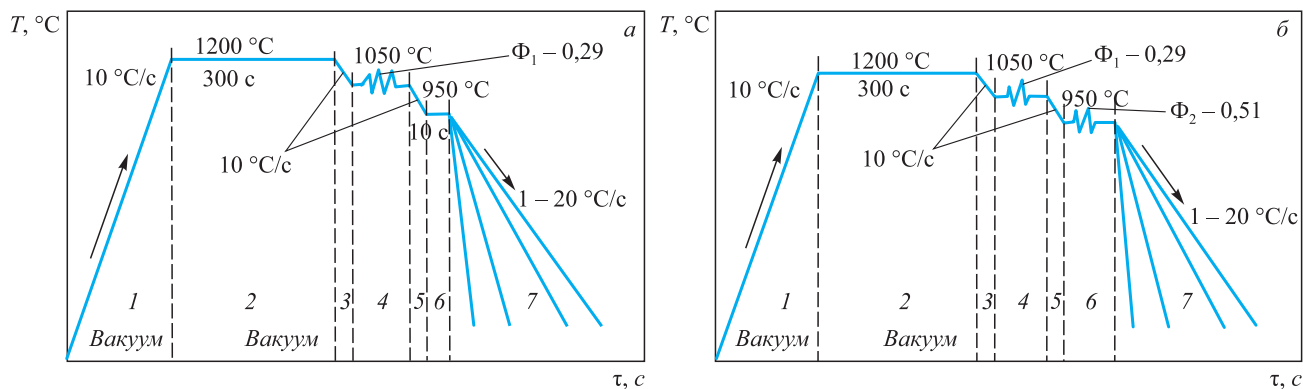


Рис. 1. Схема эксперимента: одноступенчатой деформации и двухступенчатого охлаждения (а) и двухступенчатой деформации и охлаждения (б)

Fig. 1. Experiment scheme: single-stage deformation and double-stage cooling (a) and double-stage deformation and cooling (b)

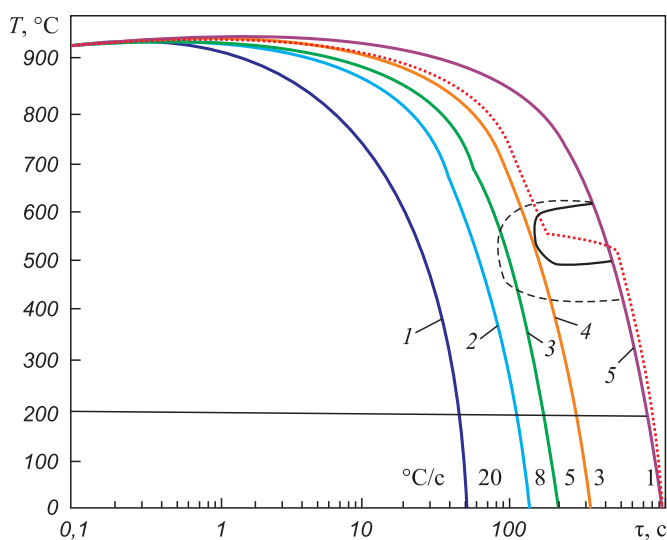


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита плавки O51 после одноступенчатой (—) и двухступенчатой (----) деформации

Fig. 2. Thermokinetic decay diagram of overchilled austenite of O51 melting after single-stage (—) and double-stage (----) deformation

что оптимальная микроструктура однородного перлита образуется в образцах плавки O76 при охлаждении металла со скоростью 1 – 3 °C/c.

### Дифференцированная закалка рельсовых проб на опытной установке

На втором этапе исследований проводили эксперименты по термической обработке воздухом проб железнодорожных рельсов с использованием опытной установки дифференцированной закалки (рис. 4), представляющей собой станину с тремя перфорированными коробами, расположенными над поверхностью головки пробы рельса. В конструкции коробов предусмотрено крепление для манометров. К каждому коробу подведен шланг от распределительного устройства с отдельным регулирующим краном. К распределительному устройству по каналу большего сечения подводится сжатый магистральный воздух. К перфорированной области коробов прикреплена пластина с соосными перфорации отверстиями. Система перфорации короба

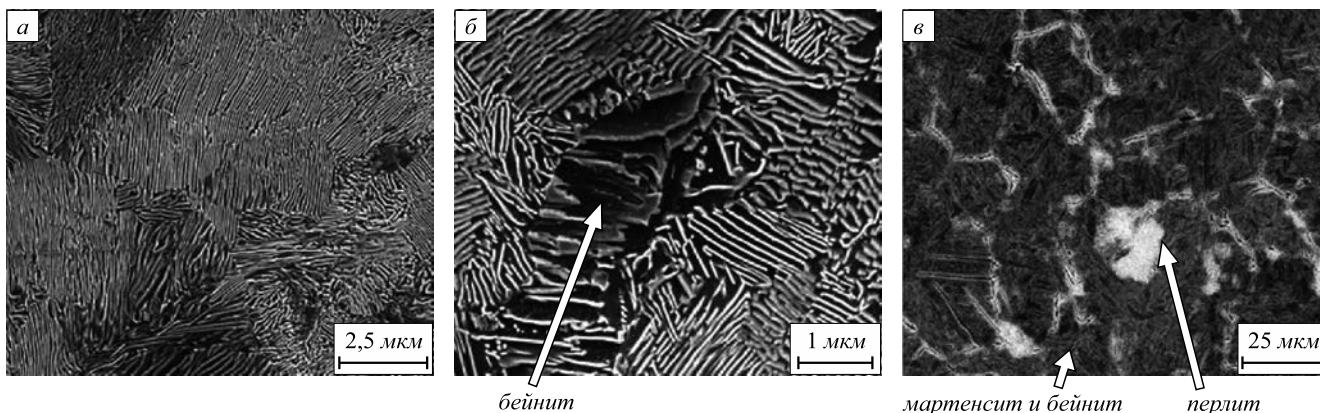


Рис. 3. Микроструктура перлита в опытном металле плавки:

а – O76 (скорость охлаждения 3,0 °C/c); б – O74 (скорость охлаждения 3,0 °C/c); в – O54 (скорость охлаждения 5,0 °C/c)

Fig. 3. Pearlite microstructure in a pilot metal of melting:

а – O76 (cooling rate of 3,0 °C/c); б – O74 (cooling rate of 3,0 °C/c); в – O54 (cooling rate of 5,0 °C/c)

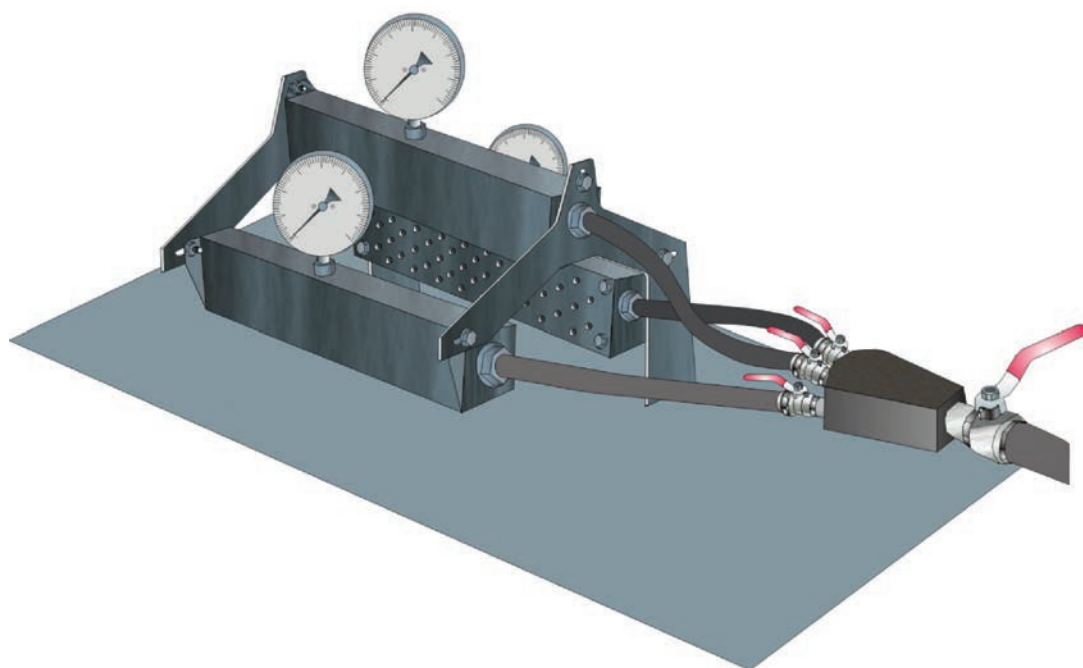


Рис. 4. Опытная установка для дифференцированной закалки рельсов

Fig. 4. Pilot plant for differentiated rail hardening

и отверстий в прикрепленной пластине образует совокупность сопел. Установка позволяет регулировать в процессе проведения эксперимента расстояние между плоскостью сопел и охлаждаемой поверхностью проб, что позволяет добиться наиболее эффективного и равномерного охлаждения. Регулировка давления в каждом коробе осуществляется индивидуальным шарнирным клапаном. Воздух подается через общий запорный клапан.

#### Исследование влияния давления воздуха на скорость охлаждения металла по сечению головки рельса

Перед проведением экспериментов по закалке рельсов определили влияние давления воздуха на скорость охлаждения металла по сечению головки рельса на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания. Для этого в пробе рельса типа Р65 длиной 400 мм были сделаны отверстия на глубине 10 и 22 мм. После нагрева и выдержки пробы при температуре приблизительно 900 °С в течение 20 – 30 мин предварительно подогретый конец термопары совмещали с отверстием в пробе и проводили ускоренное охлаждение по различным режимам. Давление воздуха в процессе охлаждения варьировали в пределах 10 ÷ 15 – 22 кПа. Среднюю скорость охлаждения ( $v_{\text{охл}}$ ) рассчитывали для интервала перлитного превращения 700 – 600 °С.

С увеличением давления воздуха скорость охлаждения возрастает (рис. 5) по зависимости:

– на глубине 10 мм:

$$v_{\text{охл}10} = 8 \cdot 10^{-4}(P_{\text{oc}})^2 + 0,0324P_{\text{oc}} + 1,4279;$$

– на глубине 22 мм:

$$v_{\text{охл}22} = 3 \cdot 10^{-4}(P_{\text{oc}})^2 + 0,0343P_{\text{oc}} + 0,7264,$$

где  $v_{\text{охл}10}$  и  $v_{\text{охл}22}$  – скорость охлаждения на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания головки (ПКГ), °С/с;  $P_{\text{oc}}$  – давление охлаждающей среды, кПа.

Для представленных выше выражений отмечена высокая достоверность аппроксимации, что позволяет прогнозировать с высокой достоверностью скорость охлаждения рельсового металла на указанных глубинах при больших давлениях.

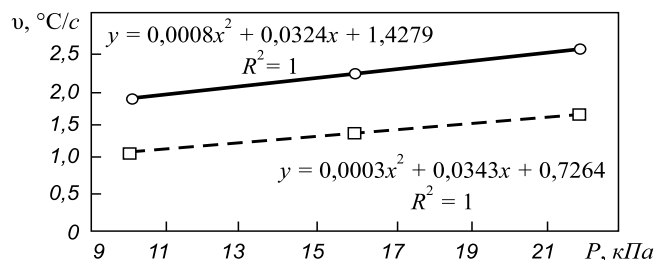


Рис. 5. Изменение скорости охлаждения металла рельса на глубине 10 мм (—) и 22 мм (----) от ПКГ в процессе охлаждения в зависимости от давления (P) воздуха

Fig. 5. Change of cooling rate of rail metal at the depth of 10 mm (—) and 22 mm (----) from the surface of head rolling at cooling process in dependence on air pressure (P)



### Дифференцированная закалка проб рельсов на опытной установке

После определения распределения скорости охлаждения по сечению головки рельса проводили эксперименты по закалке проб непосредственно после прокатки. Рельсы типа Р65 прокатывали из НЛЗ сечением 300×330 мм из стали марки Э76ХФ плавки О76 по действующей технологии. От заднего конца раската на пилах горячей резки отбирали по 2 – 3 пробы длиной 400 мм. При достижении температуры начала закалки одну пробу охлаждали на опытной установке, остальные в это время находились в коробе с горячей рельсовой обрезью для предотвращения значительного падения температуры.

Пробы, отобранные на пилах горячей резки с температурой 900 – 940 °С, подвергали подстуживанию до температур 750 – 900 °С и закалке со скоростью 2,0 – 3,3 °С/с в течение 60 – 160 с. Температуру в процессе проведения экспериментов фиксировали ручным инфракрасным пирометром типа Raynger МХ. После этого из верхней части головки каждой пробы вырезали в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2013 образцы для определения твердости по методу Бринелля на поверхности катания и по сечению головки, для испытания на растяжение и ударный изгиб, а также микрошлифы для контроля микроструктуры. Испытания на твердость проводили по методу Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диам. 10 мм при нагрузке 29 430 Н в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 – 59.

Механические свойства при растяжении определяли на разрывной испытательной машине ЕУ-40 с усилием 10 т на разрывных цилиндрических образцах диам. 6 мм и начальной расчетной длиной рабочей части 30 мм, приготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2013 и ГОСТ 1497 – 84.

Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре МК-15 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 – 78 на стандартных образцах размером 10×10×55 мм с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм при температурах +20 и –60 °С.

Микроструктуру металла выявляли методом электролитического полирования поверхности микрошлифа в 5 %-ном уксусном растворе хлорной кислоты и травлением в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

В табл. 2 – 5 представлены данные по термической обработке (температура начала ( $t_{н.то}$ ) и продолжительность ( $\tau_{то}$ ) термической обработки, предел текучести ( $\sigma_T$ ), предел прочности ( $\sigma_B$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ), относительное сужение ( $\psi$ ), ударная вязкость (КСУ), твердость (НВ)) рельсовых проб плавки О76 со скоростью охлаждения воздухом 2,0, 2,4, 2,8 и 3,3 °С/с соответственно.

При скорости закалки 2,0 °С/с с увеличением температуры начала закалки и продолжительности охлаждения улучшаются механические свойства. При более низких температурах начала закалки отмечен достаточно низкий уровень пластических свойств. Наилучшие свойства получены при закалке от 800 °С/с.

У всех проб, закаленных со скоростью 2,4 °С/с, достаточно высокие свойства. С увеличением температуры начала закалки возрастает предел текучести при сопоставимых уровнях временного сопротивления разрыву и пластических свойств. Наиболее высокая ударная вязкость получена на образцах, закаленных от температуры 750 °С.

При закалке со скоростью 2,8 °С/с уже в течение 60 с обеспечивается выполнение требований ГОСТ Р 51685 – 2013 по уровню механических свойств, но при этом на глубине 22 мм отмечена довольно низкая твердость. С ростом продолжительности охлаждения увеличиваются прочность и твердость. Для всех

Т а б л и ц а 2

#### Параметры термической обработки и свойства рельсовых проб плавки О76, закаленных со скоростью 2,0 °С/с

Table 2. Parameters of heat treatment and properties of rail tests of О76 melting tempered with a speed of 2,0 °С/с

Номер	$T_{н.то}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{то}, \text{с}$	$\sigma_T, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		НВ <sub>ПКГ</sub>	НВ <sub>10</sub>	НВ <sub>22</sub>	НВ <sub>выкр1</sub>	НВ <sub>выкр2</sub>
							+20	–60					
1.1	690	90	840	1265	9,0	19,5	14,0	7,4	393	388	383	375	385
1.2	710	105	870	1290	10	29,0	16,5	10,8	401	388	378	388	380
1.3	735	120	880	1325	10,5	33,5	13,0	7,5	406	393	375	393	395
1.4	750	120	895	1340	10,5	31,0	14,0	5,0	415	395	383	398	393
1.5	800	125	960	1360	12,0	29,0	17,0	4,9	415	401	388	404	401
1.6	860	150	945	1365	10,0	31,0	19,0	8,5	406	406	395	406	409
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350			≥800	≥1240	≥9,0	≥25,0	≥15,0	–	363 – 401		≥341		

**Параметры термической обработки и свойства рельсовых проб плавки О76, закаленных со скоростью 2,4 °С/с**

*Table 3. Parameters of heat treatment and properties of rail tests of O76 melting tempered with a speed of 2,4 °C/c*

Номер	$T_{н.то}, °C$	$\tau_{то}, c$	$\sigma_T, Н/мм^2$	$\sigma_B, Н/мм^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		НВ <sub>ПКГ</sub>	НВ <sub>10</sub>	НВ <sub>22</sub>	НВ <sub>выкр1</sub>	НВ <sub>выкр2</sub>
							+20	-60					
1.7	735	105	935	1360	10	29	12	8,4	415	401	383	395	393
1.8	745	135	940	1375	10,5	32	20,5	7,3	409	401	383	395	401
1.9	750	125	960	1360	11	34	20	6,1	415	401	378	406	398
1.10	810	125	960	1375	10	32	16	6,2	415	409	390	406	415
1.11	830	135	975	1375	10	34	16,5	7,4	415	415	388	415	388
1.12	850	125	970	1370	9,8	30	6,1	7,2	415	401	375	401	398
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350			≥800	≥1240	≥9,0	≥25,0	≥15,0	–	363 – 401	≥341			

**Параметры термической обработки и свойства рельсовых проб плавки О76, закаленных со скоростью 2,8 °С/с**

*Table 4. Parameters of heat treatment and properties of rail tests of O76 melting tempered with a speed of 2,8 °C/c*

Номер	$T_{н.то}, °C$	$\tau_{то}, c$	$\sigma_T, Н/мм^2$	$\sigma_B, Н/мм^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		НВ <sub>ПКГ</sub>	НВ <sub>10</sub>	НВ <sub>22</sub>	НВ <sub>выкр1</sub>	НВ <sub>выкр2</sub>
							+20	-60					
1.13	700	125	925	1350	12,5	29,0	10,1	7,7	415	412	393	401	401
1.14	760	110	975	1380	10,5	33,0	17,0	6,6	415	404	388	415	406
1.15	775	105	940	1370	10,0	31,0	21,0	6,1	409	406	388	409	409
1.16	810	60	850	1260	11,5	25,0	23,5	8,0	378	363	333	375	370
1.17	840	70	850	1255	11,5	26,2	23,5	7,9	378	356	337	368	370
1.18	840	125	995	1395	9,8	28,0	18,0	7,3	438	420	401	423	417
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350			≥800	≥1240	≥9,0	≥25,0	≥15,0	–	363 – 401	≥341			

образцов (за исключением пробы 1.13, закаленной от температуры 700 °С) наблюдается удовлетворительная ударная вязкость при температуре испытания +20 °С.

При закалке со скоростью 3,3 °С/с обеспечиваются достаточно высокие свойства во всем интервале (700 – 880 °С) температур начала закалки. Увеличение продолжительности термической обработки приводит к существенному повышению прочности и твердости, с уменьшением продолжительности охлаждения увеличивается ударная вязкость.

Микроструктура металла всех рельсов плавки О76 представляет собой тонкопластинчатый перлит с разрозненными выделениями феррита по границам зерен. Бейнит в микроструктуре рельсов не выявлен. Отмечено некоторое увеличение объемной доли структурно-свободного феррита с понижением температуры начала закалки.

### Промышленное освоение

На основании проведенных опытов в 2013 г. была произведена первая в России промышленная партия дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350, имеющая предел текучести 850 – 950 Н/мм<sup>2</sup>, предел прочности 1250 – 1300 Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение 10,5 – 12,5 %, относительное сужение 30 – 38 %,  $КСУ_{+20} = 0,20 \div 0,35$  МДж/м<sup>2</sup> и  $КСУ_{-60} = 0,10 \div 0,28$  МДж/м<sup>2</sup>; твердость на ПКГ составляет 373 – 393 НВ, равномерно снижается по сечению головки; твердость в шейке и подошве составляет 313 – 339 и 341 – 359 НВ соответственно.

Так как в процессе экспериментов на опытной установке использовали пробы малого линейного размера, то одним из основных вопросов, возникших на стадии

**Параметры термической обработки и свойства рельсовых проб плавки О76, закаленных со скоростью 3,3 °С/с**

*Table 5. Parameters of heat treatment and properties of rail tests of O76 melting tempered with a speed of 3,3 °C/c*

Номер	$T_{н.то}, °C$	$\tau_{то}, c$	$\sigma_T, Н/мм^2$	$\sigma_B, Н/мм^2$	$\delta, %$	$\Psi, %$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		НВ <sub>ПКГ</sub>	НВ <sub>10</sub>	НВ <sub>22</sub>	НВ <sub>выкр1</sub>	НВ <sub>выкр2</sub>
							+20	-60					
							1.19	700					
1.20	770	125	960	1365	10,0	31,0	15,0	9,2	426	409	393	409	406
1.21	787	90	895	1290	13,1	25,2	20,0	8,0	388	383	370	385	383
1.22	800	110	945	1370	11,3	29,5	15,5	7,2	415	409	388	409	409
1.23	840	105	890	1290	13,5	28,0	25,5	10,0	388	383	368	388	385
1.24	850	100	970	1380	9,8	28,0	15,0	8,0	406	404	375	393	398
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350			≥800	≥1240	≥9,0	≥25,0	≥15,0	–	363–401	≥341			

промышленного освоения дифференцированно термоупрочненных рельсов, являлось изучение равномерности закалки по длине рельса. Проведенные через каждый метр измерения твердости на поверхности катания рельса длиной 50 м (рис. 6) показали, что разброс значений твердости составляет 16 НВ и удовлетворяет требованиям стандарта (не более 30 НВ).

По сравнению с объемнозакаленными рельсами категории В рельсы категории ДТ350 отличаются несколько меньшими значениями пластичности и ударной вязкости. Указанные отличия в свойствах объясняются различиями в микроструктуре (рис. 7). Микроструктура в головке дифференцированно термоупрочненных рельсов представляет собой тонкопластинчатый перлит (сорбит закалки) с незначительными выделениями феррита по границам зерен. По сравнению с объемнозакаленными рельсами дифференцированно термоупрочненные рельсы имеют более крупное зерно (номер 7 – 8 шкалы ГОСТ 5639 – 82), меньшее количество

структурно-свободного феррита (менее 0,01 %), в то время как в объемнозакаленных рельсах эта величина достигает 0,05 – 0,06 %, а величина зерна оценивается номером 9 – 12. Межпластинчатое расстояние в объемнозакаленных рельсах составляет 85 – 100 нм, в то время как в рельсах, закаленных с прокатного нагрева, в зависимости от режима закалки эта величина составляет 105 – 160 нм.

Подобранные режимы закалки головки и подстуживания подошвы обеспечивают незначительную искривленность рельсов после охлаждения на холодильнике (рис. 8).

Измерение остаточных напряжений с использованием тензометрических датчиков, наклеенных по периметру профиля рельсов, выполнено в соответствии с методикой работы [20]. После правки рельсы имеют довольно низкий уровень остаточных напряжений: величина их не превышает 125 и 190 МПа в головке и подошве рельсов соответственно, что меньше аналогичных показателей рельсов японского производства и меньше напряжений в подошве объемнозакаленных рельсов отечественного производства (рис. 9).

**Выводы.** Разработанные по результатам научно-исследовательских работ рациональные химический состав и режимы термической обработки обеспечили в ходе промышленного освоения технологии дифференцированной закалки рельсов достижение высоких свойств. По результатам стендовых испытаний первой в России партии дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350 производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в условиях ЭК ВНИИЖТ установлено, что трещиностойкость и предел усталостной выносливости превосходят эти показатели японских рельсов и существенно выше полученных при испытании последней сертификационной партии объемнозакаленных рельсов категории Т1. После проведения стендовых испытаний

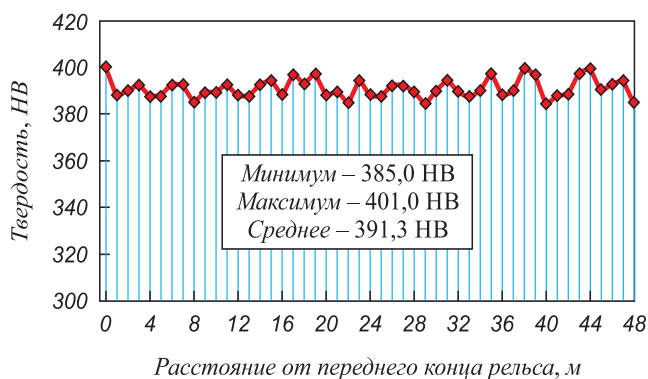


Рис. 6. Распределение твердости на поверхности катания по длине рельса категории ДТ350 длиной 50 м

Fig. 6. Solidity distribution on the surface of rolling along the rail length of DT350 category with length of 50 m

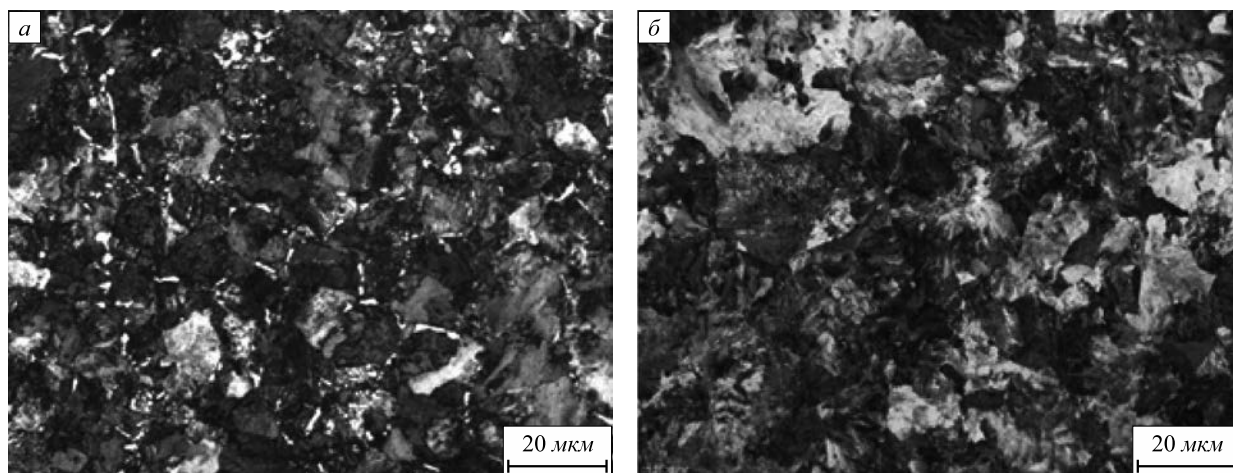


Рис. 7. Микроструктура объемно- (а) и дифференцированно (б) термоупрочненных рельсов

Fig. 7. Microstructure of bulk- (a) and differentiated (b) heat-strengthened rails



Рис. 8. Охлаждение рельсов длиной 100 м на холодильнике до температуры правки после дифференцированной закалки

Fig. 8. Rail cooling with the length of 100 m on the refrigerator up to the melting temperature after the differentiated hardening

партия рельсов ДТ350 была уложена на экспериментальное кольцо ВНИИЖТ для проведения полигонных испытаний. К настоящему времени наработка составила свыше 750 млн. т брутто.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов Л.А., Дерябин А.А., Добужская А.Б. и др. Повышение качества отечественных железнодорожных рельсов // Бюллетень «Черная металлургия». 2005. № 6. С. 43 – 49.
2. Ермаков В.М. Инновационные решения в области материалов для верхнего строения железнодорожного пути. – В кн.: Сб. научн. тр. «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений». – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2009. С. 9 – 16.
3. Семенов В. Будут ли отечественные рельсы соответствовать современным требованиям? // Металлы Евразии. 2000. № 5. С. 30 – 33.
4. Нестеров Д.К., Левченко Н.Ф., Сапожков В.Е., Шевченко А.И. Разработка состава стали и способа термообработки рельсов для работы в тяжелых условиях эксплуатации. – В сб.: «Технология производства железнодорожных рельсов и колес». – Харьков: УкрНИИМЕТ, 1989. С. 23 – 27.
5. Рейхарт В.А. Можно ли узнать, соответствуют рельсы конкретным условиям или нет? // Путь и путевое хозяйство. 1994. № 8. С. 10, 11.
6. Сравнение затрат жизненного цикла обычных и термоупрочненных рельсов // Железные дороги мира. 2006. № 3. С. 71 – 74.
7. Юнин Г.Н. О техническом перевооружении и реконструкции рельсового производства. – В кн.: Сб. докладов по материалам юбилейной рельсовой комиссии. – Новокузнецк: ОАО «Новокузнецкий полиграфкомбинат», 2002. С. 7 – 10.
8. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Деметьев. – Новокузнецк: Евраз Холдинг, 2006. – 387 с.
9. Борц А.И., Шур Е.А., Федин В.М. Перспективы развития рельсового производства в России. – В кн.: Сб. научн. тр. «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия»). – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2011. С. 94 – 103.
10. Норберт Франк. Инновационные направления в развитии рельсовой продукции. – В кн.: Сб. научн. тр. «Улучшение качества



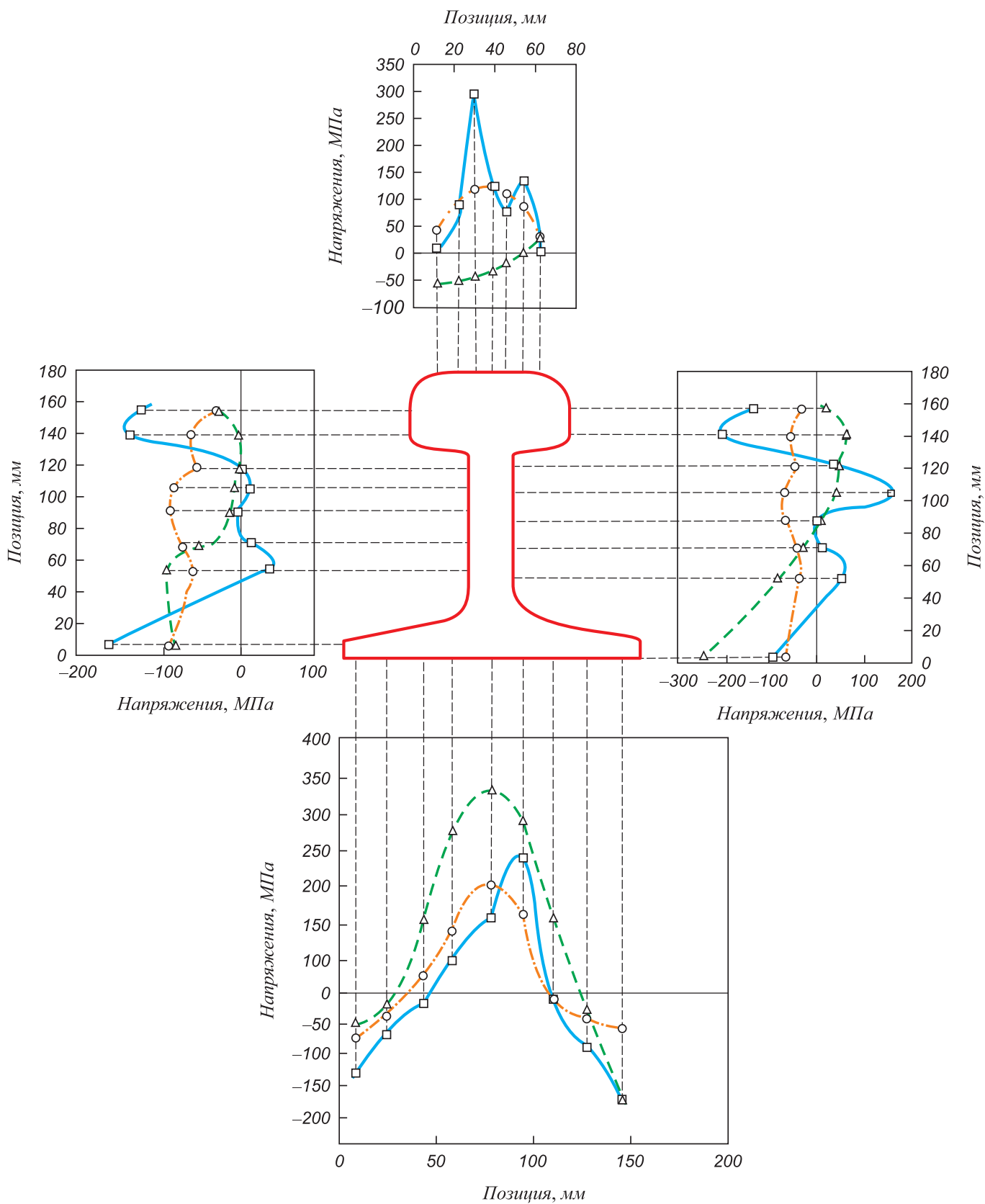


Рис. 9. Внутренние остаточные напряжения рельсов:

— рельсы производства Nippon Steel (дифференцированная термическая обработка); - - - - объемнозакаленные рельсы категории Т1;  
 - · - · - рельсы производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (дифференцированная термическая обработка)

Fig. 9. Internal residual rail stress:

— rails produced by Nippon Steel (differentiated thermal treatment); - - - - bulk-hardened rails of the category of T1;  
 - · - · - rails produced by JSC «EVRAZ ZSMK» (differentiated thermal treatment)

- и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия»). – СПб.: ОАО «УИМ», 2014. С. 121 – 125.
11. Шур Е.А., Конохов А.Д. Влияние остаточных напряжений в закаленных рельсах на возникновение и распространение усталостных трещин при статическом изгибе. – В кн.: Сб. Труды ЦНИИ МПС. Вып. 491. – М.: Транспорт, 1973. С. 29 – 37.
  12. Борц А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы ее дальнейшего развития. – В кн.: Сб. научн. тр. «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия»). – СПб.: ОАО «УИМ», 2014. С. 107 – 121.
  13. Люты В. Закалочные среды: Справ. изд. / Под ред. С.Б. Масленкова; пер. с польского. – Челябинск: Metallurgia, Челябинское отделение, 1990. – 192 с.
  14. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянцева, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
  15. Павлов В.В. Выбор технологических параметров термической обработки рельсов. – В кн.: Сб. научн. тр. «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия»). – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2008. С. 112 – 135.
  16. Поляков В.В., Великанов А.В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов. – М.: Metallurgia, 1990. – 416 с.
  17. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А. и др. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38 – 42.
  18. Добужская А.Б., Галицын Г.А., Сырейщикова В.И. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью к образованию контактно-усталостных дефектов. – В кн.: Сб. научн. тр. «Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов». – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2006. С. 64 – 81.
  19. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. – В кн.: Сб. научн. тр. «Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов». – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2006. С. 37 – 64.
  20. Борц А.И., Шур Е.А., Рейхарт В.А., Базанов Ю.А. Результаты испытаний рельсов, подвергнутых дифференцированной закалке с прокатного нагрева, влияние особенностей технологии производства на их свойства // Промышленный транспорт XXI век. 2009. № 4. С. 32 – 36.

Поступила 5 мая 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 10, pp. 704–714.

## DEVELOPMENT AND COMMERCIAL INTRODUCTION OF TECHNOLOGY FOR DIFFERENTIATED HEAT TREATMENT OF RAILWAY RAILS WITH ROLLING HEAT UTILIZATION

*E.V. Polevoi<sup>1</sup>, G.N. Yunin<sup>1</sup>, M.V. Temlyantsev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>JSC “EVRAZ - Joint West-Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The article presents the research results obtained during working out and industrial development of technology of the differentiated thermal treatment by air of railway rails with the use of heat of rolling heating. The work was performed in the conditions of JSC «EVRAZ ZSMK» during reconstruction of the rail manufacture. In the paper the authors describe the results of investigation of the influence of a chemical compound, modes of plastic deformation and thermal processing on the position of polymorphic transformation points, as well as the construction of thermokinetic diagrams of steels of a skilled chemical compound. Cooling rate on the section of a rail head depending on heat treatment parameters was investigated. The rational chemical compound and modes of thermal processing are defined. The experiments on thermal treatment of rail tests of rails were made directly after rolling. According to the results of the theoretical and laboratory data, the recommendations are developed for industrial introduction of technology of the differentiated hardening. The conducted industrial tests have shown high quality of rail production on all parameters of the specifications and technical documentation corresponding to the requirements.

**Keywords:** rails, heat treatment, microstructure, mechanical properties, differentiated thermal treatment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-704-714

### REFERENCES

1. Smirnov L.A., Deryabin A.A., Dobuzhskaya A.B., Galitsyn G.A., Syreishchikova V.I. Quality increase of domestic rails. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2005, no. 6, pp. 43–49. (In Russ.).
2. Ermakov V.M. Innovation solutions in the sphere of materials for superficial structure of railway track. In: *Sb. nauchn. tr. “Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel’sov i rel’sovykh skreplenii”* (po materialam zasedaniya nekommercheskogo partnerstva “Rel’sovaya komissiya”) [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership “Rail commission”)]. Ekaterinburg: ОАО “UIM”, 2011, pp. 94–103. (In Russ.).
3. Semenov V. Will domestic rails correspond to the modern requirements? *Metally Evrazii*. 2000, no. 5, pp. 30–33. (In Russ.).
4. Nesterov D.K., Levchenko N.F., Sapozhkov V.E., Shevchenko A.I. Development of steel composition and the way of rail thermal treatment for operation in hard service conditions. In: *Tekhnologiya proizvodstva zheleznodorozhnykh rel’sov i koles* [Production technology of rails and wheels]. Kharkov: UkrNIIMET, 1989, pp. 23–27. (In Russ.).
5. Reikhart V.A. Is it possible to learn whether rails correspond to the concrete conditions or not? *Put’ i putevoe khozyaistvo*. 1994, no. 8, pp. 10–11. (In Russ.).
6. Expenditure comparison of life cycle of common and heat-strengthened rails. *Zheleznye dorogi mira*. 2006, no. 3, pp. 71–74. (In Russ.).
7. Yunin G.N. On the technical reequipment and reconstruction of rail production. In: *Sb. dokladov po materialam yubileinoi rel’sovoi komissii* [Collected papers on the material of the jubilee rail commission]. Novokuznetsk: ОАО “Novokuznetskii poligrafkombinat”, 2002, pp. 7–10. (In Russ.).
8. Kozыrev N.A., Pavlov V.V., Godik L.A., Dement’ev V.P. *Zheleznodorozhnye rel’sy iz elektrostali* [Rails of electric steel]. Novokuznetsk: EvrazKholding, 2006, p. 387. (In Russ.).
9. Borts A.I., Shur E.A., Fedin V.M. Development perspectives of rail production in Russia. In: *Sb. nauchn. tr. “Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel’sov i rel’sovykh skreplenii”* (po materialam zasedaniya nekommercheskogo partnerstva “Rel’sovaya komissiya”) [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership “Rail commission”)]. Ekaterinburg: ОАО “UIM”, 2011, pp. 94–103. (In Russ.).
10. Norbert Frank. Innovative directions in the development of rail products. In: *Sb. nauchn. tr. “Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel’sov i rel’sovykh skreplenii”* (po materialam zasedaniya nekommercheskogo partnerstva “Rel’sovaya komissiya”) [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership “Rail commission”)]. Ekaterinburg: ОАО “UIM”, 2011, pp. 94–103. (In Russ.).

- [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership "Rail commission")]. St. Petersburg: OAO "UIM", 2014, pp. 121–125. (In Russ.).
11. Shur E.A., Konyukhov A.D. Influence of residual stresses in hardened rails on the origin and distribution of fatigue cracks at static curve. In: *Sb. Trudy TsNII MPS*. [Collected papers of CSRI MCL]. Issue 491. Moscow: Transport, 1973, pp. 29–37. (In Russ.).
  12. Borts A.I. Research of innovative rail production and perspectives of its further development. In: *Sb. nauchn. tr. "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii" (po materialam zasedaniya nekommercheskogo partnerstva "Rel'sovaya komissiya")* [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership "Rail commission")]. St. Petersburg: OAO "UIM", 2014, pp. 107–121. (In Russ.).
  13. Luty W. *Chtodziwa hartownicze*. Warszawa, 1986. (Russ.ed.: Luty W. *Zakalochnye sredy: Sprav. izd.* Trans. from Polish. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1990, 192 p.) (In Pol.).
  14. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu. *Perspektivnye tekhnologii teplovoi i termicheskoi obrabotki v proizvodstve rel'sov* [Perspective technologies of heat and thermal treatment in rail production]. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 280 p. (In Russ.).
  15. Pavlov V.V. Choice of technological parameters of rail thermal treatment. In: *Sb. nauchn. tr. "Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii" (po materialam zasedaniya nekommercheskogo partnerstva "Rel'sovaya komissiya")* [Collected scientific papers: Improvement of the quality and service conditions of rails and rail brace (according to the materials of the session of non-commercial partnership "Rail commission")]. Ekaterinburg: OAO "UIM", 2008, pp. 112–135. (In Russ.).
  16. Polyakov V.V., Velikanov A.V. *Osnovy tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnykh rel'sov* [Basis of rail production technologies]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 416 p. (In Russ.).
  17. Korneva L.V., Yunin G.N., Kozyrev N.A., Atkonova O.P., Polevoi E.V. Comparative analysis of rail product quality indexes of JSC "Novokuznetsk Metallurgical Plant" and foreign manufacturers. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.).
  18. Dobuzhskaya A.B., Galitsyn G.A., Syreishchikova V.I. Research of rail structure with different durability to the formation of contact-fatigue defects. In: *Sb. nauchn. tr. "Vliyaniye svoystv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov"* [Collected scientific papers: Influence of the metal matrix properties on rail service durability]. Ekaterinburg: OAO "UIM", 2006, pp. 64–81. (In Russ.).
  19. Shur E.A. Influence of structure on rail service durability. In: *Sb. nauchn. tr. "Vliyaniye svoystv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov"* [Collected scientific papers: Influence of the metal matrix properties on rail service durability]. Ekaterinburg: OAO "UIM", 2006, pp. 37–64. (In Russ.).
  20. Borts A.I., Shur E.A., Reikhart V.A., Bazanov Yu.A. Test results of rails, subjected to the differentiated hardening from rolling heat, influence of the peculiarities of production techniques on their characteristics. *Promyshlennyy transport XXI vek*. 2009, no. 4, pp. 32–36. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**E.V. Polevoi**, Head of the Bureau of Physical Metallurgy and Thermal Treatment of the Technical Department of Rail Area  
(Egor.Polevoj@evraz.com)

**G.N. Yunin**, Deputy of the Managing Director on the Technology of Rail Rolling (Gennady.Yunin@evraz.com)

**M.V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovations (uchebnotdel@sibsiu.ru)

Received 5 May, 2016