

Энергия Гиббса реакций в зависимости от температуры

Реакция	$\Delta_r G(T)$, кДж, при T , К					
	1500	1745	2000	2500	3000	3500
1, 2	-172,25	-251,37	-326,83	-469,26	-607,39	-742,27
3	-86,12	-125,69	-163,41	-234,63	-303,70	-371,14
6, 10	-204,09	-285,32	-363,48	-511,64	-656,29	-798,18
7, 11	-195,65	-278,65	-358,68	-510,45	-658,64	-803,92
8	-76,53	-106,99	-136,30	-191,87	-246,11	-299,32
9	-83,85	-119,42	-153,72	-218,77	-282,28	-344,54

рактеристики газов C, CO, CO₂ связаны равновесием реакции газификации углерода (12).

Наибольшую термодинамическую вероятность имеют процессы прямого восстановления WO₃, при этом более вероятно образование карбидов W₂C и WC, затем – вольфрама. Имеется термодинамическая вероятность образования этих же карбидов прямым соединением вольфрама и углерода в стандартных условиях, но она существенно меньше, в том числе и вероятности процессов косвенного восстановления WO₃.

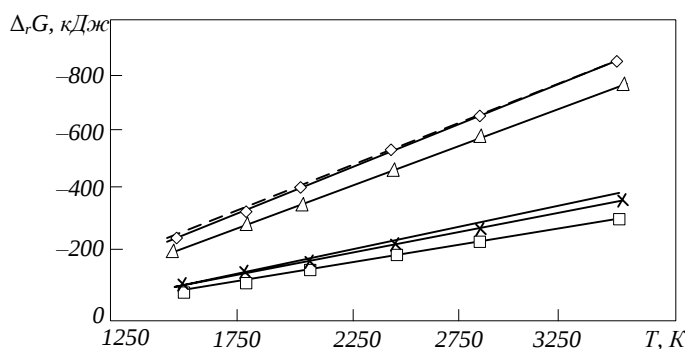
Сравнение термодинамических характеристик реакций (1) и (1a) показывает, что возможное испарение WO₃ при температурах наплавки увеличивает вероятность процесса восстановления во всех рассматриваемых реакциях.

Выводы. При постоянном присутствии твердого углерода в составе порошковой проволоки, содержащей оксиды вольфрама, возможно образование карбидов вольфрама непосредственно в процессе наплавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974. – 768 с.
2. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Т. 1. Кн. 1 / Под ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвича и др. – М.: Наука, 1978. С. 22.
4. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0 [Электронный ресурс]: data compiled and evaluated by M.W. Chase, Jr., C.A. Davies, J.R. Dawney, Jr., D.J. Frurip, R.A. McDonald, and A.N. Syvernd. – Режим доступа: <http://kinetics.nist.gov/janaf> (Дата обращения 01 июня 2016 г.).
5. Термические константы веществ. Справочник. Вып. 7 / Под ред. В.П. Глушко, В.А. Медведева и др. – М.: Наука, 1978. – 343 с.
6. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б.С. Равновесные превращения металлургических реакций. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

© 2016 г. Н.А. Козырев,
Ю.В. Бендре, В.Ф. Горюшкин,
В.М. Шурупов, О.Е. Козырева
Поступила 01 июня 2016 г.



Энергии Гиббса реакций (1) – (3), (6) – (11) в зависимости от температуры:
–Δ– – реакции (1), (2); — – реакция (3); - - - - реакции (6), (10); –◇– – реакции (7), (11);
–□– – реакция (8); –x– – реакция (9)

УДК 621.785

*Е.В. Полевой¹, А.Б. Добужская², М.В. Темлянец³*¹ АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»² ОАО «Уральский институт металлов»³ Сибирский государственный индустриальный университет**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО И ОБЪЕМНОТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ РЕЛЬСОВ**

Исследованиями [1 – 7] установлено, что микроструктура рельсовой стали, формирующаяся в процессе термической обработки, предопределяет уровень механических свойств и работоспособность рельсов в процессе эксплуатации, поэтому выявление особенностей изменения микроструктуры при изменении схемы термической обработки является важной научно-практической задачей в обеспечении их качества. В 2012 – 2013 гг. на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЗСМК) проведена коренная реконструкция рельсового производства, которая включает изменение схемы термической обработки с отказом от технологии объемной закалки рельсов в масле после печного нагрева и внедрение технологии дифференцированной термической обработки воздухом с использованием тепла прокатного нагрева [8 – 10]. В подготовительный период был выполнен большой объем экспериментальных работ на опытной установке, подробно описанной в работах [11 – 14]. Эти эксперименты направлены на выявление оптимального химического состава и определение рациональных режимов термической обработки.

В настоящей работе представлены результаты исследования микроструктуры и свойств металла проб рельсов, закаленных на указанной выше опытной установке воздухом непосредственно после прокатки, а также, в качестве сравнения, результаты исследования микроструктуры объемнозакаленных с печного нагрева рельсов промышленного производства.

Исследование проводили на образцах, вырезанных из рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф и Э76ХФ после объемной и дифференцированной закалки соответственно. Содержание основных химических элементов в металле опытных рельсов представлено в табл. 1. По содержанию химических элементов металл пробы 1 соответствует требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 для стали марки Э76Ф, металл пробы 2 соответствует требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 для стали марки Э76ХФ.

Металл пробы 2, предназначенный для дифференцированной термической обработки, отличается более высоким содержанием хрома, что обусловлено более низкой охлаждающей способностью закалочной среды (воздуха) относительно масла, применяемого для производства рельсов категории качества Т1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав металла опытных рельсов

Проба	Способ термоупрочнения	Содержание, %, химических элементов								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V
1	Объемная закалка в масле с повторного нагрева	0,76	0,88	0,32	0,014	0,011	0,08	0,07	0,12	0,04
Требования ГОСТ Р 51685 – 2000 для стали марки Э76Ф		0,71 – 0,82	0,75 – 1,15	0,25 – 0,60	≤0,025	≤0,025	≤0,20	≤0,20	≤0,20	0,03 – 0,15
2	Дифференцированная закалка воздухом с прокатного нагрева	0,79	0,78	0,55	0,014	0,015	0,46	0,08	0,14	0,07
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для марки Э76ХФ		0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	≤0,020	≤0,020	0,20 – 0,80	≤0,20	≤0,20	0,03 – 0,15

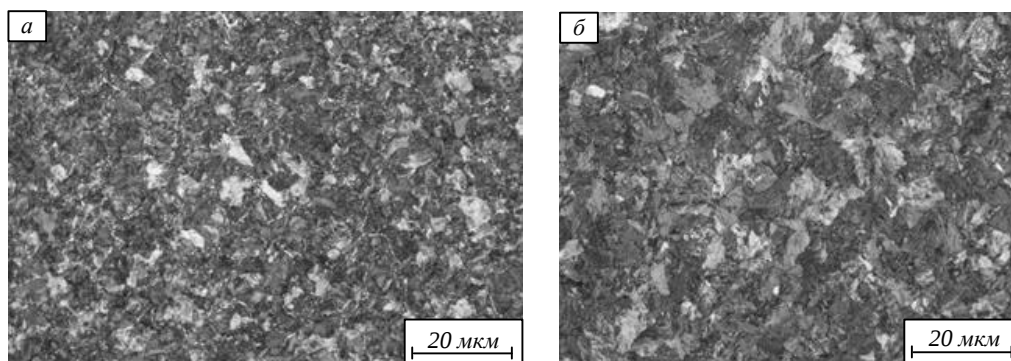


Рис. 1. Микроструктура в головке объемнозакаленных рельсов категории Т1 из стали марки Э76Ф (а) и дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ (б)

После термической обработки из верхней части головки каждой рельсовой пробы вырезали в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 образцы для определения твердости по методу Бринелля на поверхности катания и по сечению головки, испытания на растяжения и ударный изгиб, микрошлифы для контроля микроструктуры. Испытания на твердость проводили по методу Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диам. 10 мм при нагрузке 30000 Н (в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 – 59).

Механические свойства при растяжении определяли на разрывной испытательной машине ЕУ-40 с усилием в 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 и ГОСТ 1497.

Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре МК-15 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 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.

Исследования микроструктуры проводили после химического травления в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты и электроли-

тического полирования шлифов, вырезанных из верхней части головки рельсов типа Р65 и приготовленных в поперечном направлении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685. Микроструктуру исследовали на световом оптическом микроскопе «Olympus GX-71» при увеличениях до 1000 крат, а также методом сканирующей микроскопии на приборе QUANTA-200 Philips при увеличении до 10 000 крат.

Микроструктура металла рельсов при использовании обоих способов термического упрочнения представляет собой перлит (рис. 1, а, б). В структуре рельсов, подвергнутых объемной закалке присутствуют разрозненные участки феррита в виде сетки по границе первичного зерна (рис. 1, а).

Величина зерна дифференцированно термоупрочненных рельсов (рис. 1, б) оценивается номером 6-8, а объемнозакаленных рельсов – номером 10-11 шкалы ГОСТ 5639 – 82. Более мелкое зерно рельсов категории Т1 обусловлено влиянием перекристаллизационного печного нагрева под закалку.

Результаты исследования микроструктуры металла проб 1 и 2 с привлечением средств электронной микроскопии представлены в табл. 2 и на рис. 2 – 5.

Т а б л и ц а 2

Параметры микроструктуры исследованных образцов

Проба	Межпластинчатое расстояние в перлите, мкм	Величина колоний перлита, мкм	Наличие избыточного феррита	Наличие верхнего бейнита	Наличие нижнего бейнита, мартенсита
1	$0,12 \pm 0,03$ (0,09 – 0,20) $K_{\text{вариации}} = 28 \%$	1 – 10	+	+	—
2	$0,14 \pm 0,06$ (0,09 – 0,35) $K_{\text{вариации}} = 40 \%$	1 – 10	+	—	—

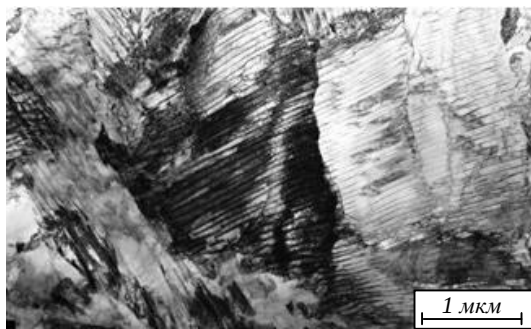


Рис. 2. Регулярные колонии перлита в структуре пробы 1 рельса категории Т1 из стали марки Э76Ф

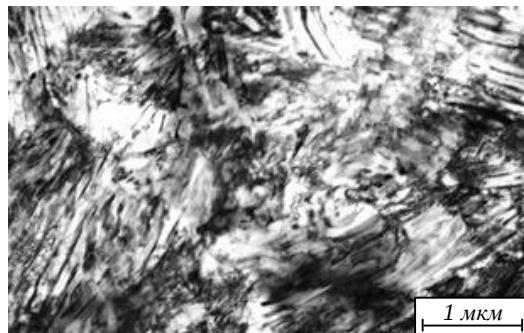


Рис. 3. Вырожденный перлит в структуре пробы 1 рельса категории Т1 из стали марки Э76Ф

Микроструктура пробы 1 рельса, подвергнутого объемной закалке, представляет собой феррито-перлитную смесь, характерную для термоупрочненных рельсов из углеродистой стали. Основная доля перлита – регулярные колонии с правильным чередованием цементитных и ферритных пластинок (рис. 2). Встречаются участки вырожденного перлита, для которого характерно присутствие цементита разнообразных форм и феррита в форме зерен (рис. 3). Вырождение вызвано раздельным ростом феррита и цементита, в противоположность образованию регулярного феррита путем одновременного выделения двух фаз. Избыточный феррит, часто наклепанный (с повышенной плотностью дислокаций), присутствует в виде сетки и отдельных зерен. Толщина ферритной сетки в двух других образцах изменяется в пределах 1 – 2 мкм.

В образце пробы 1 выявлен участок верхнего бейнита: крупные рейки феррита с прослойками цементита по границам реек (рис. 4).

Основная микроструктура образцов пробы 2 – колонии дисперсного пластинчатого перлита со следами деформации (встречаются изогнутые и расколотые пластинки цементита) (рис. 5). Как и в объемнозакаленных рельсах, в рельсах категории ДТ350 наблюдаются участки вырожденного перлита.

Межпластинчатое расстояние в перлите образцов пробы 2 несколько больше и менее од-

нородное (табл. 2). Величина перлитных колоний пробы 2 сопоставима с аналогичной величиной образцов пробы 1 (до 10 мкм).

В образце пробы 2 избыточный феррит присутствует в виде сетки и отдельных зерен, но количество его существенно меньше, чем в рельсах, подвергнутых объемной закалке. По границам феррита отмечены прерывистые выделения цементита.

Различия в микроструктуре рельсов после различных способов термического упрочнения обуславливают различия в свойствах металла. В табл. 3 представлены результаты механических испытаний металла проб 1 и 2. Дифференцированно термоупрочненные рельсы отличаются более низкими значениями ударной вязкости и несколько более высокими значениями твердости на поверхности катания и по сечению головки, а также более низкими значениями твердости в шейке и подошве относительно аналогичных величин объемнозакаленных рельсов.

Более низкие значения ударной вязкости рельсов категории ДТ350 обусловлены более крупным зерном, характерным для металла, термоупрочненного непосредственно после прокатки. Повышение твердости при сопоставимых значениях прочности в дифференцированно термоупрочненных рельсах достигается за счет уменьшения выделений феррита относительно объемнозакаленных рельсов.

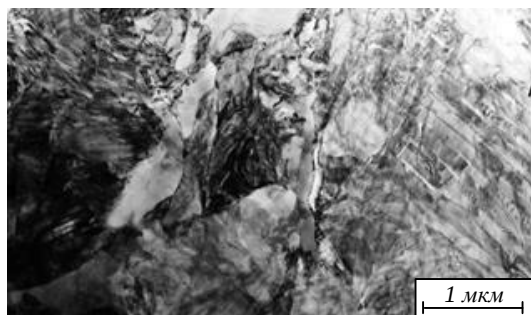


Рис. 4. Участок верхнего бейнита в структуре пробы 1 рельса категории Т1 из стали марки Э76Ф



Рис. 5. Микроструктура пробы 2 рельса категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ

Свойства рельсов

Проба	Механические свойства при растяжении				КСУ, Дж/см ² , при +20 °С	НВ							
						по сечению головки рельса, на расстоя- нии от поверхности катания				22 мкм	шейка	подошва	
	Пкг	10 мм				1	2						
		по центру	по выкруж- ке 1	по выкруж- ке 2									
1	930	1260	11	35	41; 34	370	375	—	—	373	359	366	370
2	910	1300	13	35	19; 21	395	388	385	388	375	341	352	345

За счет применения дифференцированного по сечению охлаждения рельсов категории ДТ350 твердость в шейке и подошве значительно ниже, чем в объемнозакаленных рельсах.

Прочностные и пластические свойства исследуемых рельсов находятся на сопоставимом уровне.

Выводы. При сопоставимом уровне прочностных и пластических свойств дифференцированно термоупрочненные рельсы характеризуются более однородной структурой с существенно меньшим количеством избыточного феррита, что при эксплуатации обеспечит их более высокую стойкость к возникновению контактно-усталостных дефектов и, соответственно, более длительный срок их службы. Дифференцированное охлаждение по сечению рельсов обеспечивает низкую твердость в шейке и подошве рельсов. При этом после правки таких рельсов формируется благоприятная эпюра остаточных напряжений, которые, как известно, имеют большое влияние на возникновение и развитие трещин в металле при знакопеременных нагрузках. Вместе с тем объемнозакаленные рельсы отличаются меньшей величиной зерна и, в связи с этим, более высокой ударной вязкостью, что дает им неоспоримое преимущество в районах с холодным климатом относительно рельсов, дифференцированно термоупрочненных с прокатного нагрева. Перспективным направлением для измельчения зерна в железнодорожных рельсах, термоупрочненных с прокатного нагрева, является внедрение способов контролируемой прокатки и разработка новых схем легирования и модифицирования, позволяющих сдерживать рост зерна при нагреве под прокатку или непосредственно в процессе прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ш у р Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. – В кн.: Сб. научн. тр. Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. – Екатеринбург: ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2006. С. 37 – 64.
2. Ш у р Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
3. Д о б у ж с к а я А.Б., Г а л и ц ы н Г.А., С ы р е й щ и к о в а 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: ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2006. С. 64 – 81.
4. П а в л о в В.В., Т е м л я н ц е в М.В., К о р н е в а Л.В., С ю с ю к и н А.Ю. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
5. Б о р ц А.И., З а г р а н и ч е к К.Л., Д о л г и х Л.В. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость. – В кн.: Сб. научн. тр. Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2013. С. 113 – 128.
6. П а в л о в В.В., К о р н е в а Л.В., П о л е в о й Е.В. Роль металлической матрицы в образовании контактно-усталостных дефектов в рельсах. – В кн.: Сб. научн. тр. Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2012. С. 81 – 91.
7. Р е й х а р т В.А. Анализ дефектов рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 4. С. 22 – 25.
8. Г о л о в а т е н к о А.В. Работа ЕВРАЗ ЗСМК по инновационному развитию рельсовой продукции за счет технического перевооружения и освоения новых техноло-

- гий. – В кн.: Сб. научн. докладов. – СПб: ОАО «УИМ», 2015. С. 43 – 47.
9. Полевой Е.В., Волков К.В., Головатенко А.В., Аткинова О.П., Юнусов А.М. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 4. С. 26 – 28.
10. Полевой Е.В., Волков К.В., Кузнецов Е.П., Головатенко А.В., Аткинова 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: Сб. научн. докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2014. С. 93 – 101.
11. Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянец М.В., Аткинова О.П., Юнусов А.М., Сюсюкин А.Ю. Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов // Вестник СибГИУ. 2014. № 3 (9). С. 17 – 23.
12. Полевой Е.В., Темлянец М.В., Юнусов А.М., Аткинова О.П. Опыт воздушоструйной термической обработки головки железнодорожных рельсов типа Р65 стали марки Э76Ф с использованием тепла прокатного нагрева // Вестник СибГИУ. 2015. № 1 (11). С. 5 – 11.
13. Полевой Е.В., Темлянец М.В. Определение рационального химического состава и режимов термической обработки железнодорожных рельсов стали марки Э76ХФ с использованием тепла прокатного нагрева. – В кн.: Сб. научн. докладов. «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 114 – 155.
14. Полевой Е.В., Темлянец М.В. Совершенствование химического состава и режимов термической обработки рельсов с использованием тепла прокатного нагрева. – В кн.: Сб. научн. докладов. «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 68 – 74.

© 2016 г. Е.В. Полевой,
А.Д. Добужская, М.В. Темлянец
Поступила 03 июня 2016 г.