

Е.В. Полевой¹, М.В. Темлянец², А.М. Юнусов¹, О.П. Атконова¹

¹ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

²Сибирский государственный индустриальный университет

ОПЫТ ВОЗДУХОСТРУЙНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГОЛОВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ СТАЛИ МАРКИ Э76Ф С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ПРОКАТНОГО НАГРЕВА

Термическая обработка железнодорожных рельсов наряду с химическим составом стали являются наиболее эффективными средствами повышения эксплуатационных свойств рельсов. Внедрение в конце 70-х годов прошлого века вначале на Нижнетагильском, а затем и на Новокузнецком металлургических комбинатах объемной закалки рельсов в масле с печного нагрева привело к увеличению их эксплуатационной стойкости почти в два раза [1], что на тот момент времени вывело отечественных производителей на передовые позиции, а выпускаемые рельсы являлись одними из лучших в мире. Помимо объемной закалки в масле, для термического упрочнения рельсов используются вода и водовоздушные смеси, растворы полимеров и солей. При этом термическую обработку проводят с прокатного или специального (печного, ТВЧ) нагрева [2].

Одними из ключевых моментов современного технологического процесса производства рельсов являются максимальная экономическая эффективность и экологическая безопасность. Поэтому в настоящее время наибольшее признание в качестве закалочных сред получили экологически чистые охлаждающие среды, такие как вода и воздух и смеси на их основе, а линии термической обработки встраивают в линию стана с целью использования тепла прокатного нагрева и исключения затрат на дополнительный нагрев металла. Участки закалки, использующие тепло прокатного нагрева, применяются на рельсовых предприятиях Японии (Nippon Steel & Sumitomo Metal corp.), США (EVRAZ Pueblo). Новые линии по термической обработке рельсов в г. Кардемир (Турция), г. Актюбинск (Казахстан), г. Челябинск (Россия) среди технологических решений также предусматривают использование тепла прокатного нагрева. Среди охлаждающих сред преобладают водовоздушные смеси (Казахстан, Турция), воздух (США, Япония, Франция, Россия) и водные растворы полимеров

(Австрия, Россия). Попытки термической обработки рельсов в воде до настоящего времени не увенчались успехом при производстве рельсов в промышленных масштабах в силу значительной охлаждающей способности водной среды, что приводило к высокому уровню остаточных напряжений в рельсах, возникновению неблагоприятных игольчатых структур и т.д.

Водовоздушные смеси используются с применением спрейеров или форсунок, для стабильной работы которых требуются тщательная водоподготовка и жесткий контроль получаемой охлаждающей среды.

В процессе термической обработки рельсов с применением водных растворов полимеров происходит изменение их состава за счет старения, неравномерного выноса полимера и воды при вынимании закаливаемых деталей из ванны и соответственно изменение его концентрации. В силу того, что охлаждающая способность растворов полимеров определяется их температурой и концентрацией [3, 4], то для получения однородных и стабильных структуры и свойств необходим жесткий контроль этой охлаждающей среды, ограничивающий их широкое применение для массового серийного производства рельсов и приводящий к удорожанию процесса.

Таким образом, наиболее технологичной средой является воздух, не требующий специальной подготовки, обеспечивающий высокую контролируемость процесса. Недостатком этой среды является ее довольно низкая охлаждающая способность, требующая для достижения необходимого комплекса свойств обязательного легирования рельсовой стали.

Указанные тенденции были учтены при выборе технологической схемы производства рельсового проката при реконструкции рельсового производства на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». После выбора схемы производства на комбинате была проведена серия опытов по термической обработке воздухом рельсов с отдель-

ного и прокатного нагрева на экспериментальной установке. Результаты испытаний рельсов со специального (печного) нагрева представлены в работе [5], настоящая работа является продолжением и описывает результаты термической обработки рельсовых проб стали марки Э76Ф с использованием тепла прокатного нагрева.

Объектом исследования являются пробы длиной около 400 мм, отобранные от горячекатаных железнодорожных рельсов типа Р65 стали марки Э76Ф по ГОСТ Р 51685 – 2000, термически упрочненные сжатым воздухом на опытной установке. Пробы, отобранные на пилах горячей резки с температурой 900 – 940 °С, подвергали подстуживанию до 750 – 900 °С и закалке со скоростью до 8 °С/с по различным режимам.

Температуру в процессе проведения экспериментов фиксировали ручным инфракрасным пирометром типа Raynger MX.

После экспериментов из верхней части головки каждой пробы вырезали в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2000 и ТУ 0921-276-01124323 – 2012 образцы для определения твердости методом Бринелля на поверхности катания и по сечению, испытания на растяжения и ударный изгиб, микрошлифы – для контроля микроструктуры. Испытание на твердость проводили методом Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диам. 10 мм при нагрузке 30 кН в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 – 59.

Механические свойства при растяжении определяли на разрывной испытательной машине EU-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 – 2000 и ГОСТ 1497.

Испытание 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 °С и –60 °С.

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

С целью определения возможности производства дифференцированно термоупрочненных воздухом с прокатного нагрева рельсов из углеродистой стали без дополнительного легирования хромом была проведена закалка шести проб, отобранных от рельсов типа Р65 стали марки Э76Ф, предназначенной для производства рельсов категорий Т1 и В по ГОСТ Р 51685 – 2000. Химический состав опытного металла представлен в табл. 1, из которой следует, что металл проб 1 – 3, предназначенный для производства рельсов категории Т1, отличается от металла проб 4 – 6, предназначенных для производства рельсов категории В, несколько пониженными значениями содержания углерода, марганца и ванадия.

Эксперименты по термической обработке рельсовых проб проводили в два этапа. В первой серии экспериментов провели закалку трех проб стали марки Э76Ф (Т1) при одинаковых параметрах давления и продолжительности охлаждения, но с различной температуры начала закалки (табл. 2). По результатам испытаний механических свойств установлено, что при закалке от температуры 860 °С опытный металл по прочностным свойствам несколько превосходит средний уровень значений пределов текучести и прочности рельсового металла текущего производства, но обладает несколько пониженным уровнем значений твердости, пластичности и ударной вязкости. За исключением относительного сужения механические свойства при растяжении, твердость и ударная вязкость рельсовой пробы, закаленной от температуры 860 °С, удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 и требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012.

Т а б л и ц а 1

**Содержание основных химических элементов в опытных рельсах
стали марки Э76Ф**

Номер пробы	Содержание химических элементов, % (по массе)				
	C	Mn	Si	V	Cr
1, 2, 3	0,76	0,88	0,31	0,04	0,09
4, 5, 6	0,79	0,92	0,33	0,07	0,08
–	Требования ГОСТ Р 51685 – 2000 для стали марки Э76Ф				
	0,71 – 0,82	0,75 – 1,15	0,25 – 0,60	0,03 – 0,15	≤ 0,20

Механические свойства рельсовых проб 1 – 3 стали марки Э76Ф (категории Т1)

Номер пробы	Параметры термообработки			Механические свойства при растяжении				КСУ, Дж/см ² , при температуре		Твердость, НВ							
	Р, мм водн. ст.	t, °С	τ, с	σ _т , Н/мм ²	σ _в , Н/мм ²	δ, %	ψ, %	+20 °С,	–60 °С,	ПКГ	10 мм	22 мм	Выкружка, 10 мм		Шейка	Подошва	
													1	2			1
1	2000	860	125	930	1340	9,7	22	25	16	373	370	359	373	373	331	339	335
2	2000	805	125	800	1220	11	25	21	13	373	370	361	370	368	335	325	323
3	2000	750	125	780	1230	12	27	24	13	356	354	352	361	366	321	307	306
Средние значения для рельсов кате- гории Т1 текущего производства				900	1250	12	36	40	–	380	375	354	–	–	363	372	
Требования ГОСТ Р 51685 – 2000 для рельсов категории Т1				≥800	≥1180	≥8,0	≥25	≥25	–	341 – 401	≥341	≥321	–	–	≤388		
Требования ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350				≥800	≥1240	≥9,0	≥25	≥15	–	363 – 401	≥341	≥341	≥341		≤341	≤363	
П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 3 приведены значения твердости НВ на поверхности катания, на расстоянии от поверхности 10 и 22 мм, по выкружке на рас- стоянии 10 мм, на шейке и подошве рельса.																	

Понижение температуры начала закалки до 805 °С привело к резкому снижению уровня прочностных свойств и повышению пластических, при этом значения твердости на поверхности катания (ПКГ) и по сечению головки рельса остались практически на прежнем уровне. Рельсовый металл, закаленный по такому режиму, не удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 по уровню ударной вязкости и требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 по уровню временного сопротивления разрыву.

При понижении температуры начала закалки ниже 800 °С отмечено снижение предела текучести до недопустимых стандартами значений и в целом уменьшение твердости, при этом твердость на поверхности катания ниже допустимого стандартом значения. Микроструктура металла представляет собой сорбит закалки с выделениями феррита по границам зерен, с понижением температуры начала закалки в микроструктуре отмечена более грубозернистая структура (рис. 1, 2).

Таким образом, для рельсов указанного химического состава оптимальная температура начала термической обработки должна находиться примерно в интервале от 800 до 860 °С.

На втором этапе термическую обработку проводили от температуры $t = 845$ °С. Всего

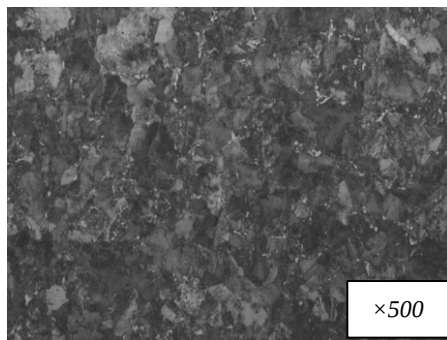


Рис. 1. Микроструктура образца 1, $P = 2000$ мм водн. ст., $t = 860$ °С, $\tau = 125$ с

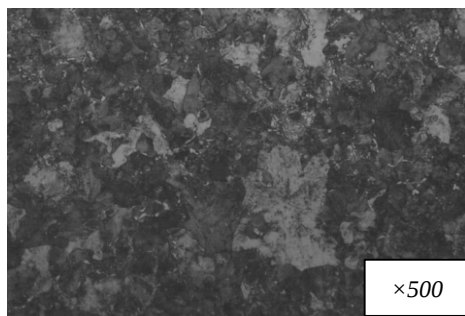


Рис. 2. Микроструктура образца 3, $P = 2000$ мм водн. ст., $t = 750$ °С, $\tau = 125$ с

были термически обработаны три пробы (4 – 6) рельсов из стали марки Э76Ф (В) при давлении P 3000, 4000, 5000 мм водн. ст. соответственно. Продолжительность τ термической обработки рельсов по первым двум режимам составила 105 с, по последнему режиму 90 с. Приведенные в табл. 3 данные показывают, что твердость исследуемых рельсов находится на сопоставимом, достаточно высоком уровне и удовлетворяет требованиям стандартов как для рельсов категории В, так и для рельсов категории ДТ350. С увеличением давления воздуха свыше 3000 мм водн. ст. резко возрастают прочностные свойства, уровень которых удовлетворяет требованиям стандартов к рельсам категорий ДТ350 и В. Следует отметить, что полученный уровень свойств ($\sigma_t = 900 - 920$ Н/мм²; $\sigma_b = 1310$ Н/мм²), по мнению японских разработчиков рельсовой стали [6], близок к теоретическому пределу прочности перлитной рельсовой стали. В целом, с увеличением давления также отмечена тенденция к повышению пластических свойств и ударной вязкости, однако уровень относительного сужения низок и не удовлетворяет требованиям стандарта. Микроструктура металла образцов 4 – 6 представляет собой сорбит закалки с разрозненными выделениями феррита по границам зерен, однако в отличие от металла образцов 1 – 3 структура несколько более дисперсна, а феррит присутствует в меньшем количестве (рис. 3).

Выводы. Проведенные опыты по термической обработке с прокатного нагрева воздухом проб рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф показали, что при закалке от 845 °С, давлении 4000 мм водн. ст. и выше в течение 90 – 105 с металл опытных рельсов удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350 по уровню механических свойств (за исключением относительного сужения), ударной вязкости, твердости по сечению головки и на поверхности катания, а

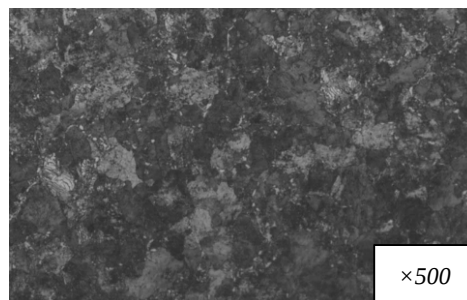


Рис. 3. Микроструктура образца 5, $P = 4000$ мм водн. ст., $t = 845$ °С, $\tau = 105$ с

Механические свойства рельсовых проб образцов 4 – 6 стали марки Э76Ф (категории В)

Номер пробы	Параметры термообра- ботки			Механические свойства при рас- тяжении				КСУ, Дж/см ² , при температуре		Твердость, НВ							
	P, мм водн. ст.	t, °C	τ, с	σ _т , Н/мм ²	σ _в , Н/мм ²	δ, %	ψ, %	+20 °C	–60 °C	ПКГ	10 мм	22 мм	Выкружка, 10 мм		Шейка	Подошва	
													1	2			1
4	3000	845	105	820	1230	9,9	23	18	8,6	390	380	359	380	380	333	359	354
5	4000	845	105	900	1310	11,5	25	27	13	385	385	383	388	388	352	347	363
6	5000	845	90	920	1310	10	22	23	8,4	388	380	370	383	385	375	366	359
Средние значения для рельсов категории В текущего производства				930	1300	12,8	39	40	32	388	383	362	–	–	373	380	
Требования ГОСТ Р 51685 – 2000 для рельсов категории В				≥850	≥1320	≥12	≥35	≥15	–	363 – 401	≥341	≥341	–	–	≤388		
Требования ТУ 0921-276- 01124323 – 2012 для рельсов катего- рии ДТ350				≥800	≥1240	≥9	≥25	≥15	–	363 – 401	≥341	≥341	≥341		≤341	≤363	

также микроструктуре. Оптимальная температура начала термической обработки составляет 800 – 860 °С. С увеличением давления свыше 3000 мм водн. ст. происходит резкое увеличение прочностных свойств и твердости при сохранении пластичности. Воздух обладает низкой охлаждающей способностью. Следует ожидать, что легирование хромом в количестве 0,3 – 0,6 % позволит увеличить стабильность переохлажденного аустенита и повысить комплекс прочностных и пластических свойств дифференцированно термически упрочненных рельсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов Л.А., Добужская А.Б., Дерябин А.А. – В кн.: Проблема повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов за счет изменения структуры и свойств стали. Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: Сб. научных трудов. – Екатеринбург: изд. ГНЦ РФ ОАО «УИМ», 2006. – 235 с.
2. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
3. В о р о ж и щ е в В.И., П а в л о в В.В., П я т а й к и н Е.М., К о р н е в а Л.В., Ш у р Е.А., Д о л г у ш и н В.В., Б у р к о в А.Г. Исследование возможности закалки рельсов в водополимерных средах // Сталь 2005. № 11. С. 126 – 130.
4. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. – 388 с.
5. В о л к о в К.В., П о л е в о й Е.В., Т е м л я н ц е в М.В., А т к о н о в а О.П., Ю н у с о в А.М., С ю с ю к и н А.Ю. Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов // Вестник СибГИУ. 2014. № 3 (9). С. 17 – 23.
6. Козлов А.В. Рельсовая сталь. Ч.1 // Производство проката. 2005. № 8. С. 41 – 45.

© 2015 г. *Е.В. Полевой, М.В. Темлянец, А.М. Юнусов, О.П. Атконова*
Поступила 27 января 2015 г.