

УДК 621.785

*К.В. Волков¹, Е.В. Полевой¹, М.В. Темлянец², О.П. Атконова¹, А.М. Юнусов¹,
А.Ю. Сюсюкин¹*

¹ОАО ЕВРАЗ «ЗСМК»

²Сибирский государственный индустриальный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОСТРУЙНОЙ ЗАКАЛКИ С ПЕЧНОГО НАГРЕВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Железнодорожные рельсы являются одним из наиболее важных элементов верхнего строения пути, от которого в значительной степени зависит безопасность грузовых и пассажирских перевозок. Кроме того, рельсы составляют наиболее затратную часть основных фондов инфраструктуры железных дорог. Эти факторы являются главной причиной ужесточения требований к качеству рельсов со стороны их основного потребителя – ОАО «Российские железные дороги».

Для надежной и безопасной эксплуатации современные рельсы должны обладать высоким металлургическим качеством [1], иметь соответствующий комплекс механических свойств: твердость, износостойкость, сопротивление хрупкому разрушению, смятию и возникновению контактно-усталостных дефектов, живучесть, долговечность и трещиностойкость [2]. Развитие сети высокоскоростного движения выдвигает свои, повышенные требования к прямолинейности рельсов. При этом рельсы должны иметь низкий уровень остаточных напряжений, а процесс их изготовления должен быть как можно более экологичным и ресурсосберегающим.

Используемая в отечественном производстве с конца 70-х годов прошлого века практика термического упрочнения рельсов методом объемной закалки в масле, несмотря на такие бесспорные достоинства, как стабильность процесса, высокий комплекс механических свойств и ударной вязкости, к настоящему моменту имеет также и существенные недостатки. Прежде всего с использованием этой технологии получают низкие технико-экономические показатели, связанные с затратами, понесенными при потреблении природного газа, необходимого для нагрева рельсов под закалку, и применение большого количества индустриального масла. В процессе объемной термической обработки рельсов происходит их коробление, что при правке приводит к наведению высокого уровня остаточных напряжений. Такая технология не позволяет про-

водить закалку длинномерных рельсов, а также рельсов из легированных марок сталей [3].

В связи с этим во избежание указанных недостатков на зарубежных предприятиях внедрены технологии дифференцированной термической обработки рельсов, при которых охлаждение головки и подошвы рельсов происходит с различными скоростями таким образом, чтобы произвести закалку головки рельсов с достижением требуемого комплекса свойств [4]. Подошва же охлаждается лишь настолько, насколько это необходимо для минимизации коробления рельсов. Для повышения экономической целесообразности и производительности наблюдаются тенденции по отказу от традиционного повторного нагрева под закалку в пользу термической обработки с использованием тепла «прокатного» нагрева [3, 5].

В мировой практике производства рельсов существуют несколько вариантов закалки, обеспечивающих различный уровень свойств по сечению рельса, среди которых можно выделить два. Примером одного из них может служить технология, применяемая на Австрийском предприятии Voest Alpiene Schienen, – закалка рельсов длиной до 120 м проводится в положении «головкой вниз» в водном растворе полимера как с прокатного, так и со специального нагрева. Указанное предприятие производит рельсы длиной до 120 м. Примером другого, принципиально иного, подхода могут являться предприятия Японской промышленности – Nippon Steel Corporation & Sumitomo Metal или Nippon Kokan, а также американское предприятие EVRAZ Pueblo. На этих предприятиях термическая обработка рельсов производится с использованием тепла прокатного нагрева, а в качестве охлаждающей среды выступает воздух, который по сравнению с полимером обладает лучшей контролируемостью и большей экологичностью. Несмотря на более высокие технико-экономические показатели, этот способ не лишен крайне важного для нашей страны недостатка. Как показали исследования, выполненные в

работе [6], по сравнению с отечественными объемно-закаленными, рельсы, закаленные с прокатного нагрева, имеют существенно более низкие показатели ударной вязкости, что приводит в случае возникновения трещины к ее катастрофическому распространению. С другой стороны, рельсы имеют довольно высокие показатели трещиностойкости, что свидетельствует о низкой вероятности возникновения трещины в период гарантийной наработки, заявленной на уровне 1 млрд. тонн брутто.

Таким образом, наиболее перспективной с точки зрения энергозатрат и ресурсосбережения является технология закалки рельсов воздухом с прокатного нагрева.

В настоящей работе проведена серия экспериментов по термической обработке рельсовых проб сжатым воздухом с отдельного печного нагрева, целью которых является определение перспективных режимов термической обработки и химических составов рельсовой стали в рамках подготовки к освоению технологии промышленного производства дифференцированно термически упрочненных рельсов.

Объектом исследования являются 400-мм пробы, отобранные от горячекатаных железнодорожных рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф текущего производства, изготовленных по ГОСТ Р 51685 – 2000, а также рельсов опытных плавов Л1 – Л4 из стали марки Э78ХСФ, дополнительно микролегированных ниобием в количестве до 0,06 %. Содержание основных элементов в металле опытных плавов представлено ниже:

Плав-	Массовая доля химических элементов, %					
	С	Mn	Si	Cr	V	Nb
Л1	0,79	1,09	0,43	0,57	0,04	0,035
Л2	0,79	1,12	0,43	0,58	0,04	0,042
Л3	0,79	1,10	0,42	0,59	0,04	0,048
Л4	0,75	0,83	0,55	0,42	0,04	0,060

Как видно из представленных данных металл плавов Л1 – Л3 по содержанию основных химических элементов имеет сопоставимый химический состав и в основном отличается по содержанию ниобия. Металл плавки Л4 отличается от плавов Л1 – Л3 самым высоким содержанием ниобия и кремния, а также более низкими содержаниями углерода, марганца и хрома.

Дифференцированную термическую обработку проводили после нагрева проб в газовой печи до температуры 850 – 930 °С, выдержки при этой температуре в течение 20 – 30 мин, подстуживания до температуры начала закалки, которая варьировалась от 800 до 880 °С, и

охлаждения сжатым воздухом при постоянном давлении от 1000 до 2500 мм вод. ст. в течение 90 – 200 с. По окончании термической обработки рельсы остывали до комнатной температуры в условиях естественной конвекции.

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

Внешний вид установки для термической обработки рельсов представлен на рис. 1. Установка состоит из трех перфорированных коробов, расположенных над поверхностью головки рельса. В конструкции коробов предусмотрено крепление для манометров. К каждому коробу подведен шланг от распределительного устройства с отдельным регулирующим краном. К распределительному устройству подведен сжатый магистральный воздух с каналом большего сечения.

К перфорированной области коробов прикреплена пластина с соосными перфорации отверстиями. Система перфорации короба и отверстий в прикрепленной пластине образуют совокупность сопел.

Установка позволяет регулировать в процессе проведения эксперимента расстояние между плоскостью сопел и охлаждаемой поверхностью проб, что дает возможность добиться наиболее эффективного и равномерного охлаждения.

Регулировка давления в каждом коробе ведется индивидуальным шарнирным клапаном. Подача воздуха осуществляется общим запорным клапаном.

После проведения экспериментов от каждой пробы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2000 были отобраны: темплет для измерения твердости на поверхности катания и по сечению головки и шейки рельса, образец для определения механических свойств при растяжении; образец для проведения испытания на ударный изгиб при температурах комнатной и –60 °С, а также образец для



Рис. 1. Опытная установка дифференцированной термической обработки рельсов типа Р65 сжатым воздухом

контроля микроструктуры, вырезанный в верхней части головки.

Испытание на твердость проводили методом Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диам. 10 мм при нагрузке 3000 кгс (или $3 \cdot 10^4$ Н) 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 осуществляли на маятниковом копре МК-15 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 на стандартных образцах размером $10 \times 10 \times 55$ мм с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм.

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

Измерение скорости охлаждения по сечению рельсовой пробы проводили при помощи специально подготовленного полнопрофильного темплета, отобранного от рельса типа Р65, с высверленными на глубине 5, 10 и 20 мм отверстиями. После нагрева темплета и выдержки до заданной температуры (~ 900 °С) предварительно подогретый конец термопары совмещали с отверстием в пробе и проводили ускоренное охлаждение по различным режимам.

Определение скоростей охлаждения по сечению головки рельса

На рис. 2 представлено изменение средних скоростей охлаждения опытного металла на различном расстоянии от поверхности катания в зависимости от давления сжатого воздуха при

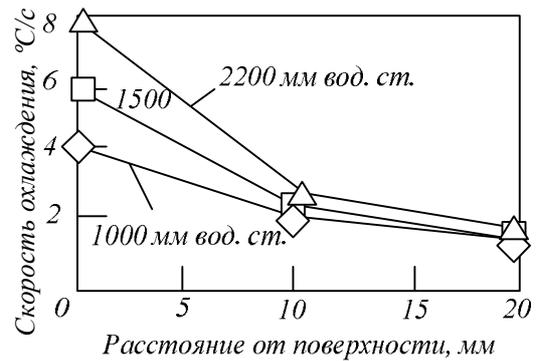


Рис. 2. Изменение средних скоростей охлаждения опытного металла на различном расстоянии от поверхности катания в зависимости от давления сжатого воздуха при охлаждении в интервале температур 770 – 670 °С

охлаждению в интервале температур 770 – 670 °С. Видно, что средняя скорость охлаждения в интервале перлитного превращения составляет порядка 4 – 8 °С/с на поверхности катания, 2,0 – 2,5 °С/с – на глубине 10 мм и 1,0 – 1,6 °С/с – на глубине 20 мм.

Температура конца охлаждения в зависимости от температуры нагрева и продолжительности охлаждения составила от 450 до 680 °С.

По завершении охлаждения в течение примерно 60 – 95 с происходит разогрев поверхности проб за счет теплоотдачи внутренних слоев. После выравнивания температуры скорость охлаждения внутренних и поверхностных слоев одинаковая и находится на уровне примерно 0,13 – 0,5 °С/с (рис. 3).

Термическая обработка рельсовых проб из стали марки Э78ХСФ

Для проведения опытов по закалке на опытной установке отобрали пробы длиной 400 мм от рельсов типа Р65 из стали марки Э78ХСФ

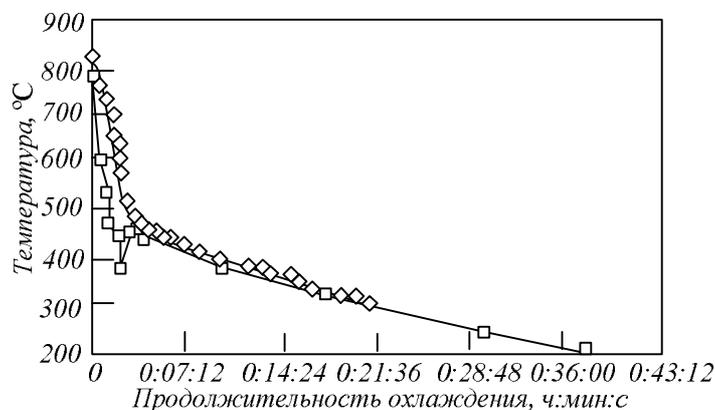


Рис. 3. Температура рельсов на поверхности (□) и на глубине 20 мм (◇) при охлаждении в течение 210 с при давлении сжатого воздуха 1000 мм вод. ст.

четырёх плавок, микролегированных ниобием, условно замаркированных как Л1 – Л4.

Закалку рельсовых проб длиной до 400 мм проводили после нагрева до температуры около 900 °С, выдержки при этой температуре в течение 30 мин, подстуживания до температуры начала охлаждения 770 – 870 °С. Охлаждение проводили при давлении 1000, 1500 и 2200 мм вод. ст. в течение 90 – 280 с. Режимы термической обработки и результаты механических испытаний представлены в табл. 1, откуда видно, что при охлаждении с давлением 1000 мм вод. ст. при температурах начала закалки менее 825 °С и продолжительности охлаждения менее 150 с опытный металл не удовлетворяет требованиям нового рельсового стандарта для рельсов категории ДТ350 в основном из-за низких прочностных свойств и твердости. Температура самоотпуска для металла, показавшего удовлетворительные значения свойств, не превышала 580 °С.

Микроструктура рельсового металла плавок Л1 – Л3 при указанных условиях охлаждения с поверхности на глубину до 2 и до 5 мм с поверхности выкружки имеет недопустимые участки бейнитной структуры. Далее по глубине микроструктура опытного металла состоит из тонкопластинчатого перлита, степень дисперсности которого уменьшается по мере удаления от поверхности. В микроструктуре металла плавки Л4 бейнит не выявлен.

С повышением давления до 1500 – 2000 мм вод. ст. значительно увеличиваются прочностные свойства и твердость опытного металла. Необходимый уровень свойств достигается при охлаждении в течение 110 с. При этом существенно увеличивается глубина бейнитного слоя с поверхности рельсовых проб, отобранных от рельсов с более высоким содержанием марганца и хрома. В микроструктуре металла плавки Л4 при указанном давлении бейнит не обнаружен.

Таким образом, по соотношению уровня механических свойств, твердости, ударной вязкости и микроструктуре оптимальным комплексом свойств обладает металл плавки Л4.

Закалка проб рельсов текущего производства категории Т1 из стали марки Э76Ф

В качестве сравнения с опытным металлом подвергли закалке четыре пробы, отобранные от рельсов из стали марки Э76Ф текущего производства категории Т1. Температура начала охлаждения составила 845 °С, продолжительность 130 – 180 с, давление воздуха 1500 и 2100 мм вод. ст.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что металл текущего производства категории Т1 из стали Э76Ф удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350 по уровню пластических свойств при растяжении и ударной вязкости, но имеет достаточно нестабильный уровень твердости на поверхности катания и по сечению, а также достаточно низкие значения временного сопротивления разрыву.

По сравнению с опытным металлом рельсы текущего производства имеют несколько пониженный уровень механических свойств и твердости, что обусловлено более низким содержанием в них элементов, повышающих устойчивость переохлажденного аустенита, и несколько более высокий уровень ударной вязкости, что может быть обусловлено влиянием ниобия.

Микроструктура металла рельсов текущего производства, закаленных на опытной установке, представляет собой тонкопластинчатый перлит без выделений зернограничного феррита.

Выводы. Оптимальный уровень свойств для рельсов типа Р65 категории ДТ350, соответствующий требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 из стали марки Э78ХСФ, достигается закалкой с отдельного нагрева от температур свыше 825 °С в течение не менее 150 с; при давлении 1500 – 2200 мм вод. ст. – в течение не менее 110 с. Повышение содержания элементов, увеличивающих устойчивость аустенита (хрома, марганца свыше 0,45 и 0,83 % соответственно), нецелесообразно, так как это приводит к появлению в микроструктуре нежелательной бейнитной структуры и повышенному уровню твердости на поверхности катания и по сечению. Рельсы текущего производства, закаленные на опытной установке с прокатного нагрева, показали удовлетворительные значения механических свойств и низкие показатели твердости, что обусловлено недостаточной охлаждающей способностью воздуха по сравнению с закалкой в масле для этой марки стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев, Л.В. Корнева, Т.Н. Осколкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
2. Ш у р Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
3. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев,

Режимы термической обработки и свойства образцов рельсов типа Р65 опытного металла

Плавка	Проба	Температура, °С			P, мм вод. ст.	τ, с	σ _т , кгс/мм ²	σ _в , кгс/мм ²	δ, %	ψ, %	КСУ _{20/-60} Дж/см ²	НВ _{пкг}	НВ ₁₀	НВ ₂₂	НВ _{выкр 10}		НВ _ш	НВ _{подшва}	
		T _{н.о.}	T _{к.о.}	T _{п.в.}															
Л1	1	820	680	690	1000	90	56	103	19,5	58	66/-	297	295	286	288	300	278	280	277
	2	860	600	615	1000	150	77	125	14,5	37	32/14	398	385	356	368	388	335	347	339
	3	845	430	505	1000	210	87	132	14,0	48	17/11	401	388	359	385	383	339	333	326
	4	780	365	460	1500	150	72	117	20,0	56	43/13	356	345	321	337	333	302	290	292
	5	825	400	485	2100	150	100	136	11,0	50	20/3,7	398	380	345	368	368	333	323	321
Л2	1	815	560	660	1000	90	55	103	18,0	56	66/12	315	306	292	300	311	278	272	275
	2	845	н/д	580	1000	150	80	128	13,0	45	35/25	375	370	354	363	370	321	315	319
	3	800	385	466	1000	150	71	115	15,5	58	55/15	350	345	326	335	333	306	298	293
	4	830	410	495	2200	150	65	114	17,0	48	27/11	401	388	354	375	375	337	335	329
	5	845	430	540	1500	150	103	142	16,5	55	30/11	444	385	370	415	415	359	368	368
Л3	1	845	430	545	1000	150	85	130	12,0	48	35/8,5	393	380	356	378	378	333	329	331
	2	825	440	510	1000	180	86	128	13,0	48	31/11	398	383	352	380	380	325	326	323
	3	780	375	460	2100	150	75	116	15,0	55	52/8,6	345	341	323	339	337	298	288	300
	4	845	420	525	1500	160	99	137	15,0	52	23/9	432	395	378	398	395	345	352	354
	5	845	300	386	1500	280	95	133	14,0	51	25/8,6	451	390	383	429	415	343	356	356
Л4	1	815		600	1000	150	62	112	15,5	47	43/-	341	341	325	335	331	300	302	302
	2	845	490	530	1000	180	85	126	15,5	51	25/7,2	366	366	354	368	368	315	323	321
	3	840	400	520	2100	150	87	130	17,5	52	17/11	378	380	352	383	380	329	337	335
	4	830	446	600	1500	110	89	128	16,5	51	26/8,4	378	383	361	385	388	341	343	343
	5	830	425	535	2100	135	88	130	16,0	51	16/9,7	380	380	356	388	385	341	350	345
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350						Не менее					352-401	Не менее				Не более			
						82	126	9,0	25,0	15		341	321	341	341	363			

Примечание. Здесь и в табл. 2 T_{н.о.}, T_{к.о.} и T_{п.в.} – температуры начала, конца охлаждения и после выравнивания; P – давление сжатого воздуха; τ – продолжительность охлаждения; КСУ_{20/-60} – испытание на ударный изгиб при температурах 20 и –60 °С.

Режимы воздушно-струйной термической обработки и свойства образцов рельсов типа Р65 из металла текущего химического состава стали марки Э76Ф

Проба	Температура			P, мм вод. ст.	τ, с	σ _т , кгс/мм ²	σ _в , кгс/мм ²	δ, %	ψ, %	КСУ _{20/-60} Дж/см ²	НВ _{пкг}	НВ ₁₀	НВ ₂₂	НВ _{выкр 10}		НВ _ш	НВ _{подошва}	
	T _{н.о.}	T _{к.о.}	T _{п.в.}															
1	845	395	480	2100	150	85	119	15	47	31/31	347	343	325	341	341	302	307	307
2	845	400	580	1500	130	82	124	16,5	46	36/23	359	356	341	356	356	307	321	319
3	845	380	540	1500	150	84	120	15,5	46	36/24	343	349	337	343	343	302	313	311
4	845	350	460	1500	180	84	124	15,5	45	34/12	359	359	350	359	359	319	331	333
Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350						Не менее					352 – 401	Не менее				Не более		
						82	126	9,0	25,0	15		341	321	341	341	363		

- Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
4. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. – М.: Интекст, 2002. – 208 с.
 5. Масару Уэда, Кацую Иванов, Такэси Ямамото. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки Nippon Steel // Инженерные решения. 2012. Январь. С. 9 – 11.
 6. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Аткинова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38 – 42.

© 2014 г. К.В. Волков, Е.В. Полевой, М.В. Темлянецв, О.П. Аткинова, А.М. Юнусов, А.Ю. Сюсюкин
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОСЛОЙКИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МАГНИЕВО-АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ*

При сварке плавлением магния с алюминием образуются хрупкие интерметаллиды, резко снижающие работоспособность конструкций, поэтому обычно используются сваренные взрывом магниево-алюминиевые переходники [1] различных конструкций. Наиболее часто используют два типа соединений: 1) композиция МА2-1-АД1-АМг6, применяемая для эксплуатации при температурах от -196 до $+100$ °С, не допускающая при дуговой сварке перегрева границы АД1-МА2-1; 2) четырехслойная композиция МА2-1-ВТ1-0-АД1-АМг6, рассчитанная на эксплуатацию в диапазоне температур от -196 до $+500$ °С. Прочность таких соединений в направлении, нормальном границе раздела слоев, определяется свойствами наиболее слабого из составляющих материалов, которым обычно является прослойка алюминия, играющим роль буфера пластичности и диффузионного барьера. С уменьшением толщины прослойки (ее обычно характеризуют относительной толщиной $\chi = h/d$, где h – толщина прослойки, d – диаметр испытываемого образца) начинает проявляться

эффект контактного упрочнения. Для расчета прочности композитов с мягкими прослойками ранее разработан графоаналитический метод [1, 2], обеспечивающий приемлемые для практики результаты. После разработки метода конечных элементов и создания на его основе пакетов компьютерных программ, например SIMULIA/ABAQUS, появилась возможность более точного моделирования поведения различных процессов – от гидродинамических потоков расплавов металлов [3] и температурных полей в нагреваемых слябах под прокатку [4] до деформации композиционных материалов с резко различающимися по прочностным характеристикам слоями.

Целью настоящей работы являлась верификация моделирования с использованием пакета компьютерных программ SIMULIA/ABAQUS поведения при растяжении магниево-алюминиевых композитов с мягкой прослойкой при нормальной и повышенных температурах.

Для верификации результатов моделирования был изготовлен сваркой взрывом слоистый композит МА2-1-АД1-АМг6, в котором толщина алюминиевого подслоя изменялась в диапазоне $0,1 - 1,5$ мм, а толщины магниевого

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00418).