

УДК 620.179.16

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ*

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

Л. В. Волкова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Платунов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. В. Булдакова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Л. В. Гущина, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Представлены результаты экспериментальных измерений остаточных напряжений в элементах рельса, измеренных электромагнитно-акустическим структуроскопом СЭМА с использованием метода акустоупругости. Оценка внутренних напряжений произведена также в отдельных элементах рельса. Настройка чувствительности структуроскопа СЭМА и определение коэффициента акустоупругой связи выполнены в лабораторных условиях путем создания в отрезке рельса напряженного состояния одноосного сжатия в направлении продольной оси на испытательной машине Instron 300DX. Отмечена высокая чувствительность и достоверность измерений с погрешностью определения механических напряжений до 2 МПа и соответствие зарегистрированных структуроскопом механических напряжений нагрузке рельса, реализуемой на стенде. Остаточные напряжения, определяемые акустоупругим методом по измеряемой разнице времени пробега двух ортогонально поляризованных сдвиговых волн на участке от головки до подошвы и обратно, являются усредненными по сечению рельса и несут информацию о величине продольных напряжений в рельсе. Диапазон разброса измеренных в лаборатории остаточных напряжений в отрезках рельсов составил 49...67 МПа. С ростом сжимающей нагрузки происходит уменьшение скорости головной волны на всех измеряемых участках рельса. Для относительной оценки остаточных напряжений в отдельных элементах рельса выполнены измерения скорости распространения акустических волн по головке, шейке и подошве, показавшие, что остаточные напряжения в продольном направлении рельса, как правило, носят сжимающий характер для головки и растягивающий – для шейки.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, рельс, остаточные напряжения.

Введение

Согласно ГОСТ 51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» при приемке дифференцированно упрочненных железнодорожных рельсов необходима оценка остаточных внутренних напряжений, появляющихся в процессе изготовления. Существующие методы оценки остаточных напряжений, основанные на отборе проб, являются выборочными и трудоемкими [1–3]. Поэтому создание приборов и методов определения внутренних напряжений в рельсах является важным этапом неразрушающего контроля. Исследования и разработка методов контроля остаточных напряжений ведутся разными научными школами с использованием таких видов контроля, как магнитные, вихретоковые, акустические [4–8]. Наиболее подходящим методом для решения этой проблемы является ультразвуковой метод, однако сложности приме-

нения контактных методов не позволяют их широко использовать [9–12]. Исследования в области оценки мешающих факторов позволили существенно увеличить чувствительность методик [13–16]. Используемый в работе структуроскоп СЭМА основан на явлении акустоупругости, он не предусматривает предварительного отбора проб и может быть реализован в потоке производства.

Цель работы – исследовать распределение остаточных напряжений в образцах рельсов с использованием метода акустоупругости и структуроскопа СЭМА, а также связь скорости головных волн с механическими напряжениями в рельсовой стали.

Используемые подходы.

Методики измерений

В основу технологии измерений внутренних напряжений в рельсах положена разработанная в [17] методика контроля остаточных напряже-

ний в цельнокатаных вагонных и бандажированных локомотивных колесах. В основе методики лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений, связанных через акустоупругие коэффициенты [18–20]. Скорости распространения волн определяются по результатам измерений времени пробега импульсов сдвиговых волн, поляризованных в ортогональных направлениях относительно оси рельса, эхоимпульсным поляризационно-временным методом. Ввод и прием сдвиговых волн осуществляется с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей. Волны излучаются нормально к поверхности ввода с установкой излучающего и приемного преобразователя на плоский участок рельса (рис. 1). Регистрация импульсов осуществляется специально разработанным структуроскопом СЭМА, внесенным в реестр средств измерений Госстандарта (госреестр № 61957–15). Структуроскоп и методика измерений соответствуют требованиям ГОСТ Р 52731–2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля

механических напряжений», базируются на теории акустоупругости. Структуроскоп СЭМА, используемый для измерения напряженного состояния по результатам измерения относительной разности времени прохождения двух сдвиговых волн, имеет следующие основные технические характеристики:

- погрешность измерения времен прихода импульсов 0,5 нс;
- диапазон измерения временных интервалов 30...1000 мкс;
- материал контролируемых объектов – ферромагнитные стали;
- толщина контролируемого объекта 20...500 мм;
- амплитуда генератора зондирующих импульсов 2,0 кВ;
- рабочая частота 2,5 МГц;
- полоса пропускания усилителя 0,6...6,6 МГц;
- коэффициент усиления 66 дБ;
- плата АЦП – разрешение 8 бит, частота дискретизации 500 МГц, ширина полосы пропускания 100 МГц.

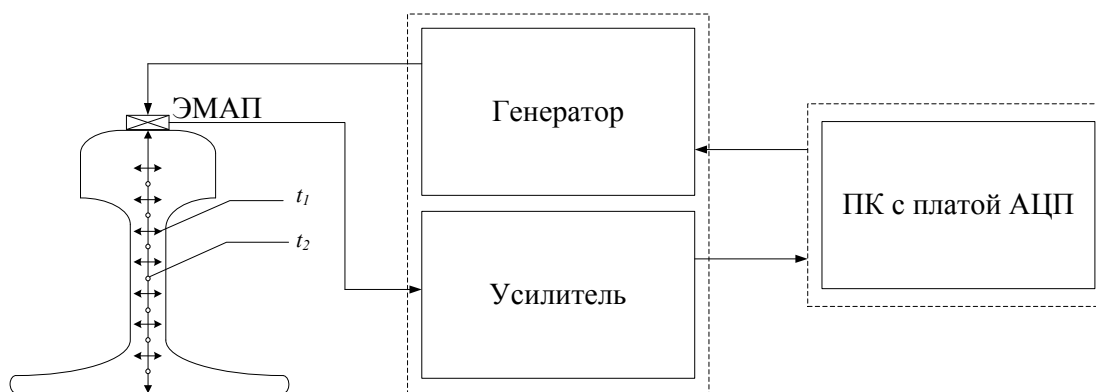


Рис. 1. Блок-схема структуроскопа СЭМА

Специализированное программное обеспечение позволяет одновременно наблюдать на мониторе прибора эхограммы многократных перетражений двух сдвиговых волн с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Использование в программе методов когерентного временного накопления и автокорреляционной обработки дало возможность обеспечить инструментальную погрешность оценки напряжений ± 2 МПа.

Структуроскоп СЭМА включает в себя генератор электрических импульсов, формирующий мощный зондирующий электрический импульс, ЭМА-преобразователь, возбуждающий и принимающий короткие акустические импульсы поперечных волн, усилитель и плату АЦП, встроенную в ЭВМ, на экране которого отобра-

жается осциллограмма отраженных импульсов от подошвы рельса (рис. 2, а).

ЭМА-преобразователь, установленный на поверхность катания головки рельса, возбуждает ортогонально поляризованные поперечные волны, которые отражаются от подошвы рельса и принимаются этим же ЭМА-преобразователем. Принятые сигналы обрабатываются в специализированном программном обеспечении Prince, в котором можно сравнивать импульсы двух принятых сигналов, измерять их амплитуду и разницу времени по переходу сигнала через ноль [21, 22] (рис. 2, б).

Разница во времени прохождения импульсов, поляризованных вдоль и перпендикулярно продольной оси рельса, пропорциональна значению остаточных напряжений. Напряжения расчи-

тываются исходя из допущения о значительном превышении продольных напряжений относительно поперечных. Значения времени распространения поперечных волн t_1 и t_2 по одному участку рельса используются для вычисления остаточных напряжений σ по формуле

$$\sigma = D \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad (1)$$

где D – коэффициент упруго-акустической связи для исследуемого материала, определенный экспериментально и равный –131 ГПа.

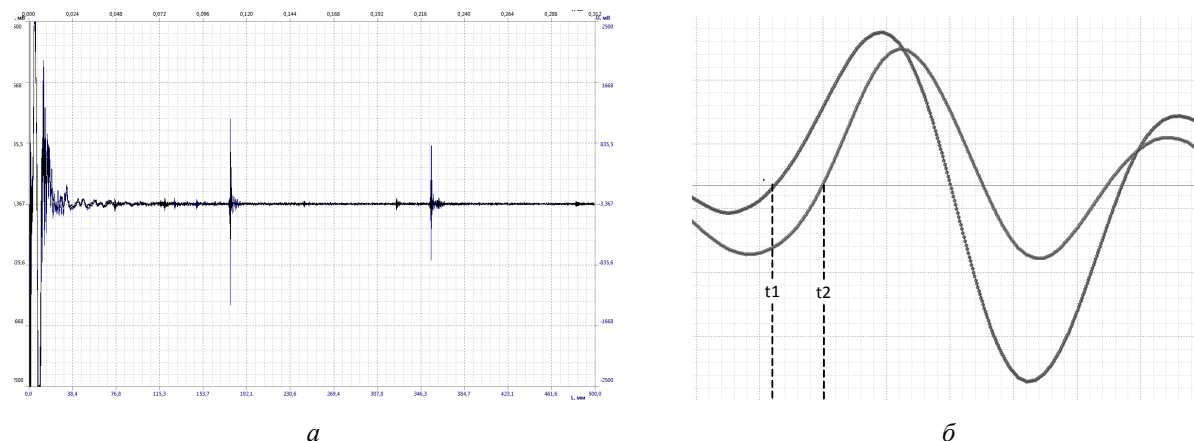


Рис. 2. Осциллограмма донных импульсов (а), разность времени прихода импульсов (б)

Исследования остаточных напряжений в отрезках рельсов

Исследование остаточных напряжений в рельсах производилось согласно рис. 3 со стороны поверхности катания рельса, со стороны шейки и с торцевой поверхности рельса в сечениях головки, шейки и подошвы.

Экспериментальная оценка сжимающих механических напряжений проводилась на 5 образцах рельсов разных плавок категории ДТ 350 длиной 250 мм. Образцы подвергались сжатию в направлении продольной оси на машине Instron 300DX. Результаты исследований остаточных напряжений для рельсов, изготовленных по технологии дифференцированного упрочнения, приведены в табл. 1.

Распределение остаточных напряжений в рельсах по высоте имеет разброс 49...65 МПа. При измерении напряжений с торцевой поверхности наблюдаются растягивающие на-

пряжения в головке рельса и изменение напряженного состояния в шейке рельса до сжимающих напряжений, которые начинают расти в подошве рельса.

Для оценки характера накопления остаточных напряжений в рельсах под действием статических нагрузок были проведены испытания на сжатие в испытательной машине Instron 300DX. В процессе испытаний каждый рельс нагружался статической нагрузкой в пределах 0...240 кН с шагом 20 кН, а затем производилась пошаговая разгрузка рельсов. Для оценки накопления напряженного состояния при повторно-статических нагрузках один из рельсов подвергался пяти циклам испытаний. Результаты испытаний приведены в табл. 2–5.

На рис. 4 приведена типичная зависимость напряжений, полученных при акустических измерениях, от величины сжимающей нагрузки на машине Instron 300DX.

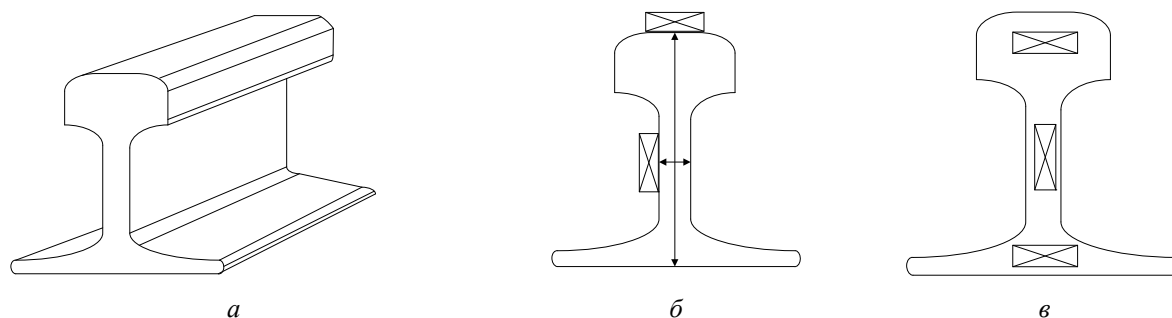


Рис. 3. Схемы установки датчиков для оценки распределений напряжений в рельсах по сечению а со стороны головки, б – со стороны шейки, в – с торцевой стороны по головке шейке и подошве

Таблица 1. Результаты исследований остаточных напряжений в рельсах

№ рельса	Значения напряжений в элементах рельса ЭМА-преобразователя									
	По высоте со стороны головки			По толщине шейки		С торцевой стороны головки		С торцевой стороны шейки		С торцевой стороны подошвы
	Номер точки измерения									
	1	2	3	1	2	1	1	1		
1	55	61	56	-88	-84	15		5		9
2	49	50	57	-172	-45	32		-43		-5
3	57	50	52	-19	-5	34		1		70
4	65	62	67	-16	-73	43		-74		-27
5	62	62	52	-62	-29	43		-2		75

Таблица 2. Результаты исследований напряжений в рельсе № 4 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения напряжений в элементах рельса, МПа					
	По высоте рельса со стороны головки		По толщине шейки		По высоте рельса со стороны подошвы	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	62	65	-23	-39	72	67
20	61	62	-70	-16	73	69
40	53	62	-62	-8	73	67
60	70	61	-70	-39	59	72
80	65	61	-39	-70	62	61
100	58	55	-70	-47	58	65
120	53	53	-54	-62	62	64
140	62	55	-78	-31	59	59
160	55	55	-93	-23	59	59
180	53	50	-86	-78	58	51
200	55	45	-86	-62	51	50
220	45	47	-93	-117	40	48
240	42	42	-70	-70	44	44

Таблица 3. Результаты исследований напряжений № 4 при повторно-статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения напряжений по высоте рельса со стороны головки, МПа									
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		4-й цикл		5-й цикл	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	62	65	67	65	65	73	62	65	65	72
20	61	62	65	67	64	65	62	75	58	61
40	53	62	62	61	64	67	65	72	70	58
60	70	61	56	58	58	62	65	61	67	58
80	65	61	58	61	62	64	62	62	65	65
100	58	55	55	58	58	62	64	61	64	84
120	53	53	55	56	53	61	59	55	62	64
140	62	55	58	53	59	56	55	79	61	75
160	55	55	53	53	56	50	48	56	55	62
180	53	50	51	53	50	45	50	47	53	62
200	55	45	48	47	53	51	53	47	51	59
220	45	47	47	51	47	56	45	45	47	51
240	42	42	47	47	47	47	44	44	50	50

По результатам исследований получено, что с ростом сжимающей нагрузки происходит уменьшение уровня остаточных напряжений в рельсе как по высоте, так и в шейке. Приложение нагрузки до 240 МПа приводит к умень-

шению напряженного состояния на 50 МПа, а в шейке – на 100 МПа. Последовательное нагружение и разгрузка рельса не приводит к росту внутренних напряжений независимо от количества циклов нагружения.

Таблица 4. Результаты исследований напряжений в рельсе № 1 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения напряжений в элементах рельса, МПа					
	По высоте рельса со стороны головки		По толщине шейки		По высоте рельса со стороны головки	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	64	62	-93	-194	65	93
20	64	67	-31	-233	64	72
40	61	86	-16	-194	69	69
60	65	67	117	-194	84	84
80	64	67	16	-194	83	83
100	65	56	-62	-280	62	40
120	55	79	-101	-256	93	36
140	58	58	-62	-233	55	47
160	53	75	-39	-280	61	45
180	55	51	-101	-319	40	26
200	44	39	-54	-295	45	31
220	45	41	-39	-264	69	20
240	36	36	-155	-155	33	33

Таблица 5. Результаты исследований напряжений в рельсе № 2 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения напряжений в элементах рельса, МПа					
	По высоте рельса со стороны головки		По толщине шейки		По высоте рельса со стороны подошвы	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	48	45	-62	-54	59	58
20	48	48	-62	-23	54	59
40	42	40	-93	-23	48	56
60	42	39	-54	-39	45	54
80	33	28	-85	-31	42	40
100	33	37	-85	-54	45	44
120	25	28	-70	-62	39	44
140	20	25	-85	-62	33	34
160	17	26	-101	-101	30	31
180	17	16	-108	-108	30	34
200	14	16	-108	-93	25	28
220	9	14	-116	-124	20	25
240	25	25	-147	-147	19	19

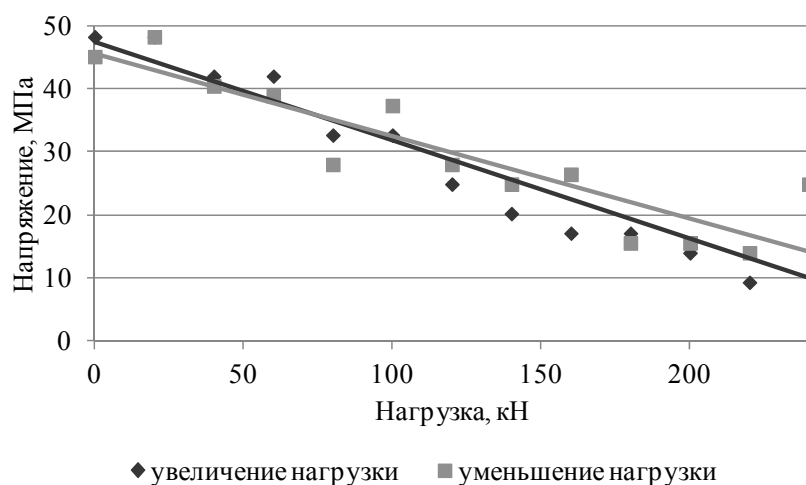


Рис. 4. Графики распределения напряжений в рельсе № 2 в зависимости от прикладываемой нагрузки

Исследования скорости головных волн в образцах рельсов

Известно, что скорость головных волн наиболее чувствительна к уровню остаточных напряжений [23]. С целью оценки напряженного состояния в различных частях рельса была проведена экспериментальная оценка изменения скоростей головных волн в образцах рельсов № 1, 2, 4 в зависимости от прикладываемой нагрузки. Образцы подвергались сжатию в направлении продольной оси на машине Instron 300DX.

Измерения проводились со стороны поверхности катания головки, с боковой поверхности головки и со стороны нижней части подошвы. Рельс нагружался в пределах 0...240 кН с шагом 20 кН. Рельс № 4 подвергался повторно-статической 5-кратной нагрузке до 240 кН для оценки накопления структурных изменений в стали. Результаты измерений приведены в табл. 6–9.

На рис. 5 приведена зависимость скорости головной волны под поверхностью катания головки, полученной при акустических измерениях, от величины сжимающей нагрузки на машине Instron 300DX.

На рис. 6 приведена зависимость скорости головной волны под боковой поверхностью головки, полученной при акустических измерениях, от величины сжимающей нагрузки на машине Instron 300DX.

По результатам исследований получено, что с ростом сжимающей нагрузки происходит уменьшение скорости головной волны на всех измеряемых участках рельса. Последовательное нагружение и разгрузка рельса приводит к изменению первоначального значения скорости головной волны, что может быть связано с изменением структурного состояния в разных элементах рельса на глубине порядка 10 мм.

Таблица 6. Результаты исследований скорости головной волны в рельсе № 4 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения скорости головной волны в элементах рельса, м/с					
	Под поверхностью катания головки		Под боковой поверхностью головки		Под поверхностью подошвы	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	5885	5881	5904	5903	5872	5870
20	5884	5882	5905	5904	5872	5870
40	5884	5882	5905	5904	5872	5870
60	5884	5882	5905	5904	5872	5871
80	5884	5882	5905	5904	5872	5871
100	5883	5882	5905	5904	5872	5871
120	5883	5882	5905	5904	5872	5871
140	5883	5882	5905	5905	5872	5871
160	5883	5882	5905	5904	5872	5871
180	5883	5882	5905	5905	5872	5872
200	5883	5882	5905	5905	5873	5872
220	5883	5882	5905	5905	5873	5873
240	5883	5883	5905	5905	5873	5873

Таблица 7. Результаты исследований скорости головной волны в рельсе № 4 при повторно-статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения скорости головной волны под поверхностью катания рельса, м/с									
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		4-й цикл		5-й цикл	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	5885	5881	5881	5880	5880	5878	5878	5877	5878	5877
20	5884	5882	5881	5879	5879	5878	5878	5878	5877	5877
40	5884	5882	5881	5880	5879	5878	5878	5877	5877	5877
60	5884	5882	5881	5880	5879	5878	5878	5878	5877	5876
80	5884	5882	5880	5879	5879	5878	5878	5878	5877	5877
100	5883	5882	5881	5880	5879	5878	5878	5878	5877	5876
120	5883	5882	5881	5880	5879	5879	5878	5877	5877	5877
140	5883	5882	5881	5880	5879	5879	5878	5878	5877	5877
160	5883	5882	5881	5880	5879	5879	5878	5878	5877	5877
180	5883	5882	5881	5880	5879	5879	5878	5878	5877	5877
200	5883	5882	5880	5880	5879	5879	5878	5878	5877	5877
220	5883	5882	5880	5881	5879	5879	5878	5878	5877	5877
240	5883	5883	5881	5881	5879	5879	5878	5878	5877	5877

Таблица 8. Результаты исследований скорости головной волны в рельсе № 1 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения скорости головной волны в элементах рельса, м/с					
	Под боковой поверхностью головки		Под поверхностью катания головки		Под поверхностью подошвы	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	5906	5905	5883	5881	5880	5881
20	5906	5906	5883	5881	5881	5881
40	5906	5906	5883	5881	5881	5881
60	5906	5906	5883	5881	5881	5882
80	5907	5907	5883	5881	5881	5882
100	5907	5906	5883	5881	5881	5882
120	5907	5907	5883	5881	5882	5882
140	5908	5907	5882	5882	5882	5882
160	5908	5907	5883	5882	5882	5883
180	5908	5908	5882	5882	5883	5883
200	5908	5908	5883	5882	5883	5883
220	5908	5909	5882	5882	5883	5883
240	5909	5909	5883	5882	5884	5884

Таблица 9. Результаты исследований скорости головной волны в рельсе № 2 при статическом нагружении

Нагрузка, кН	Значения скорости головной волны в элементах рельса, м/с					
	Под боковой поверхностью головки		Под боковой поверхностью головки		Под поверхностью подошвы	
	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка	нагружение	разгрузка
0	5915	5894	5876	5873	5889	5887
20	5914	5896	5875	5874	5888	5887
40	5914	5897	5875	5874	5889	5887
60	5914	5897	5875	5874	5889	5887
80	5914	5899	5875	5874	5889	5888
100	5913	5900	5876	5874	5889	5888
120	5912	5901	5875	5874	5889	5889
140	5911	5902	5875	5874	5889	5889
160	5910	5903	5875	5875	5889	5889
180	5910	5904	5875	5875	5890	5889
200	5909	5906	5875	5875	5890	5889
220	5909	5907	5875	5875	5890	5889
240	5908	5908	5875	5875	5890	5890

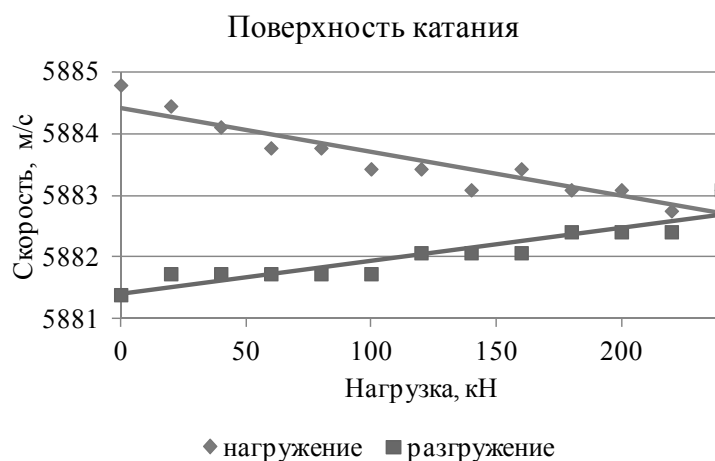


Рис. 5. График изменения скорости головной волны под поверхностью катания головки рельса №4 в зависимости от прикладываемой нагрузки

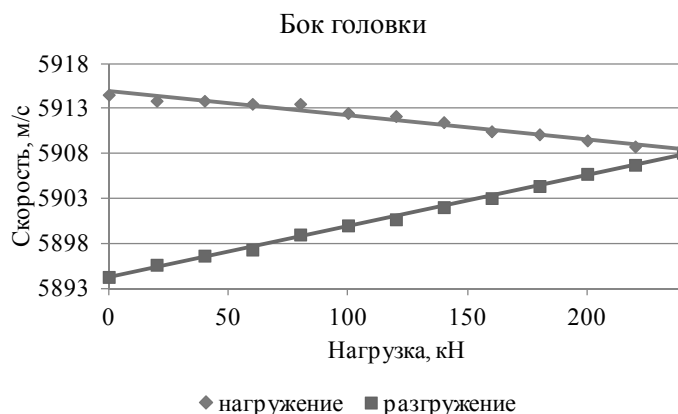


Рис. 6. График изменения скорости головной волны в боковой части головки рельса № 2 в зависимости от прикладываемой нагрузки

Выводы

1. Настройка чувствительности структуроскопа СЭМА и определение коэффициента акустоупругой связи выполнены в лабораторных условиях путем создания в отрезке рельса напряженного состояния одноосного сжатия в направлении продольной оси на испытательной машине Instron 300DX. Отмечена высокая чувствительность и достоверность измерений с погрешностью определения механических напряжений до 2 МПа и соответствие зарегистрированных структуроскопом механических напряжений нагрузке рельса, реализуемой на стенде.

2. Остаточные напряжения, определяемые акустоупругим методом по измеряемой разнице времен пробега двух ортогонально поляризованных сдвиговых волн на участке от головки до подошвы и обратно, являются усредненными по сечению рельса и несут информацию о величине продольных напряжений в рельсе. Диапазон разброса измеренных в лаборатории остаточных напряжений в отрезках рельсов составил 49...67 МПа.

3. Для относительной оценки остаточных напряжений в отдельных элементах рельса выполнены измерения скорости распространения акустических волн по головке, шейке и подошве, показавшие, что остаточные напряжения в продольном направлении рельса, как правило, носят сжимающий характер для головки и растягивающий – для шейки.

Отмечено, что с ростом сжимающей нагрузки происходит уменьшение скорости головной волны на всех измеряемых участках рельса.

Библиографические ссылки

1. Формирование полей внутренних напряжений в рельсах при длительной эксплуатации / О. А. Пере-

гудов, К. В. Морозов, В. Е. Громов, А. М. Глезер, Ю. Ф. Иванов // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 34–37.

2. Самойлович Ю. А. Анализ термонапряженного состояния рельсов при объемной закалке // Металлург. 2011. № 11. С. 65–72.

3. Покровский А. М., Воронов Ю. В., Третьяков Д. Н. Численное моделирование температурно-структурного и напряженного состояний в процессе закалки железнодорожного рельса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 6(675). С. 13–20.

4. Захаров В. А., Молин С. М., Ленков С. В. Контроль структуры ферромагнитного материала по напряженности магнитного поля между полюсами приставного двухполюсного намагничивающего устройства // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 53–59 [Zakharov V. A., Molin S. M., Lenkov S. V. (2017). Control of the structure of a ferromagnetic material by the strength of the magnetic field between the poles of a two-pole magnetizing device. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 2, pp. 126-133. DOI: 10.1134/S1061830917020103].

5. Структуроскопия ферромагнитных изделий в режиме приложенного поля постоянных магнитов / В. А. Захаров, С. М. Молин, С. В. Ленков, Г. Я. Безлюдько // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19, № 2. С. 50–54.

6. Патент на полезную модель RUS 139165 22.11.2013. Сканирующее устройство для определения коэрцитивной силы ферромагнитных изделий / В. А. Захаров, С. М. Молин, С. В. Ленков, М. А. Гусев, А. А. Зотов

7. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов / В. Н. Костин, Т. П. Царькова, А. П. Ничипурук, В. Е. Лоскутов, В. В. Лопатин, К. В. Костин // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54–67.

8. Оборудование для контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов и металлоконструкций / Б. Н. Антипов, А. М. Ангалев, В. Л. Венгринович, Ю. П. Паньковский, В. Л. Цу-

керман // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2008. № 3. С. 66–69.

9. Бехер С. А., Курбатов А. Н., Степанова Л. Н. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах // Вестник РГУПС. 2013. № 2. С. 104–110.

10. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Н. Курбатов, Е. С. Тенитилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7(655). С. 103–109.

11. Патент на изобретение RUS 2057330. Акустический способ определения внутренних механических напряжений в твердых материалах / В. Т. Власов, Б. Н. Марин, Е. С. Юрчук, Ю. А. Коровкин, В. Е. Ударцев.

12. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений / М. Я. Марусина, А. В. Федоров, В. А. Быченко, И. В. Беркутов // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 34–37.

13. Муравьева О. В., Зорин В. А. Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 3–9 [Murav'eva O. V., Zorin V. A. (2017). The multiple shadow method for controlling cylindrical objects using Rayleigh waves. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 5, pp. 337-342. DOI: 10.1134/S1061830917050059].

14. Муравьева О. В., Ленков С. В., Мышкин Ю. В. Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 3–10 [Muraveva O. V., Myshkin Y. V., Lenkov S. V. (2016). Factors affecting the attenuation of torsional waves in pipes under stress conditions on contact viscoelastic media. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 52, no. 9, pp. 485-491. DOI: 10.1134/S1061830916090035].

15. Муравьева О. В., Соков М. Ю. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократного электромагнитно-акустического метода контроля прутков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. № 3(71). С. 46–50.

16. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 17–23 [Murav'eva O. V., Petrov K. V., Sokov M. Y., Gabbasova M. A. (2015). Modeling and investigation of the process of propagation of acoustic waves radiated by a passive electromagnetic-acoustic transducer along the elliptical section of a rod. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 51, no. 7, pp. 400-406. DOI: 10.1134/S1061830915070050].

17. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34–37 [Mu-

rav'ev V. V., Volkova L. V., Gromov V. E., Glezer A. M. (2016). Estimation of residual stresses in rails using electromagnetic-acoustic method of input-reception of waves. *Deformacija i razrushenie materialov* [Russian Metallurgy (Metally)], vol. 66, no. 10, pp. 992-995. DOI: 10.1134/S003602951610013X].

18. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12–20 [Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platonov A. V. and Kulikov V. A. (2016). Electromagnetic-acoustic method for studying the stress-strain state of rails. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 52, no. 7, pp. 370-376. DOI: 10.1134/S1061830916070044].

19. Измерение температуры рельсов в бесстыковом пути / В. А. Куликов, В. В. Муравьев, К. А. Никитин, Г. В. Брагин // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 53–55 [Kulikov V. A., Murav'ev V. V., Nikitin K. A., Bragin G. V. (2017). Measurement of the temperature of rails in a bondless path. *Izmeritel'naja tehnika* [Measurement Techniques], vol. 60, no. 5, pp. 487-490. DOI: 10.1007/s11018-017-1222-3].

20. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 41–44.

21. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 243–250.

22. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 565–571. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571.

23. Муравьев В. В., Булдакова И. В., Гущина Л. В. К вопросу об акустической структуроскопии сварных соединений рельсов // Сварка и диагностика. 2017. № 6 (66). С. 28–31.

References

1. Peregudov O. A., Morozov K. V., Gromov V. E., Glezer A. M., Ivanov Yu. F. (2015). *Deformacija i razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials], no. 11. pp. 34-37 (in Russ.).
2. Samojlovich Yu. A. (2011). *Metallurg* [Metallurgist], no. 11, pp. 65-72 (in Russ.).
3. Pokrovskij A. M., Voronov Yu. V., Tretyakov D. N. (2016). *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], no. 6, pp. 13-20 (in Russ.).
4. Zakharov V. A., Molin S. M., Lenkov S. V. (2017). Control of the structure of a ferromagnetic material by the strength of the magnetic field between the poles of

a two-pole magnetizing device. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 2, pp. 126-133. DOI: 10.1134/S1061830917020103.

5. Zakharov V. A., Molin S. M., Lenkov S. V., Bezlyudko G. Ya. (2016). *V mire nerazrushajushhego kontrolja* [In the world of nondestructive testing], vol. 19, no. 2, pp. 50-54 (in Russ.).

6. Zaharov V. A., Molin S. M., Lenkov S. V., Gusev M. A., Zotov A. A. Patent RUS 139165, 22.11.2013.

7. Kostin V. N., Tsar'kova T. P., Loskutov V. E., Kostin K. V., Nichipuruk A. P., Lopatin V. V. (2009). *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 45, no. 11, pp. 786-796 DOI: 10.1134/S1061830909110059.

8. Antipov B. N., Angalev A. M., Vengrinovich V. L., Pan'kovskij Ju. P., Cukerman V. L. (2008). *Oborudovanie i tehnologii dlja neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for oil and gas complex], no. 3, pp. 66-69 (in Russ.).

9. Beher S. A., Kurbatov A. N., Stepanova L. N. (2013). *Vestnik RGUPS* [RGUPS Bulletin], no. 2, pp.104-110 (in Russ.).

10. Stepanova L. N., Beher S. A., Kurbatov A. N., Tenitilov E. S. (2013). *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building], no. 7, pp. 103-109 (in Russ.).

11. Vlasov V. T., Marin B. N., Jurchuk E. S., Korovkin Ju. A., Udarcsev V. E. Patent RUS 2057330, 27.03.1996.

12. Marusina M. Ja., Fedorov A. V., Bychenok V. A., Berkutov I. V. (2014). *Izmeritel'naja tehnika* [Measurement techniques], no. 10, pp. 34-37 (in Russ.).

13. Murav'eva O. V., Zorin V. A. (2017). The multiple shadow method for controlling cylindrical objects using Rayleigh waves. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 53, no. 5, pp. 337-342. DOI: 10.1134/S1061830917050059.

14. Muraveva O. V., Myshkin Y. V., Lenkov S. V. (2016). Factors affecting the attenuation of torsional waves in pipes under stress conditions on contact viscoelastic media. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 52, no. 9, pp. 485-491. DOI: 10.1134/S1061830916090035.

15. Murav'eva O. V., Sokov M. Yu. (2016). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], vol. 71, no. 3, pp. 46-50 (in Russ.).

16. Murav'eva O. V., Petrov K. V., Sokov M. Y., Gabbasova M. A. (2015). Modeling and investigation of the process of propagation of acoustic waves radiated by a passive electromagnetic-acoustic transducer along the elliptical section of a rod. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 51, no. 7, pp. 400-406. DOI: 10.1134/S1061830915070050.

17. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Gromov V. E., Glezer A. M. (2016). Estimation of residual stresses in rails using electromagnetic-acoustic method of input-reception of waves. *Deformacija i razrushenie materialov* [Russian Metallurgy (Metally)], vol. 66, no. 10, pp. 992-995. DOI: 10.1134/S003602951610013X.

18. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platonov A. V. and Kulikov V. A. (2016). Electromagnetic-acoustic method for studying the stress-strain state of rails. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 52, no. 7, pp. 370-376. DOI: 10.1134/S1061830916070044.

19. Kulikov V. A., Murav'ev V. V., Nikitin K. A., Bragin G. V. (2017). Measurement of the temperature of rails in a bondless path. *Izmeritel'naja tehnika* [Measurement Techniques], vol. 60, no. 5, pp. 487-490. DOI: 10.1007/s11018-017-1222-3.

20. Muravyov V. V., Volkova L. V., Platonov A. V., Buldakova I. V. (2017). *Deformatsiya i Razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials], no. 1, pp. 41-44 (in Russ.).

21. Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Obukhov S. A., Efremov A. B. (2011). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 1, pp. 243-250 (in Russ.).

22. Strizhak V. A., Prjahin A. V., Hasanov R. R., Efremov A. B. (2017). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], vol. 60, no. 6, pp. 565-571 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571.

23. Murav'ev V. V., Buldakova I. V., Gushchina L. V. (2017). *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], no. 6(66), pp. 28-31 (in Russ.).

Investigations of the Structural and Strain-Stress State of the Rails of Current Production by the Acoustic Elasticity Method

V. V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, UdmFRC UB RAS, Izhevsk, Russia

L. V. Volkova, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Platonov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I. V. Buldakova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

L. V. Gushchina, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The results of experimental measurements of residual stresses in rail elements, measured by the electromagnetically-acoustic structurescope SEMA using the acoustoelasticity method are presented. The evaluation of internal stresses is also given in individual rail elements. The sensitivity setting of the SEMA structurescope and the determination of the acoustoelastic coupling coefficient are performed in the laboratory by creating in section of rail a stress state of a uniaxial compression in the direction of the longitudinal axis in the rail of the Instron 300DX testing machine. High sensitivity and measurement reliability with an error of determination of mechanical stresses up to 2 MPa and correspondence of mechanical stresses of the rail registered by the structurescope, realized at the stand, are noted. Residual stresses are determined by the acoustoelastic method from the measured difference in the travel times

of two orthogonally polarized shear waves on the section from the head to the sole and conversely are averaged over the section of the rail and carry information on the magnitude of the longitudinal stresses in the rail. The scatter range of the residual stresses measured in the laboratory in rails sections was 49-67 MPa. With the growth of the compressive load, the velocity of the head wave decreases along all measured sections of the rail. To measure the residual stresses in individual rail elements, measurements were made of the propagation velocity of acoustic waves along the head, neck and sole, showing that the residual stresses in the longitudinal direction of the rail are, as a rule, of a compressive nature for the head and tensile for the neck. For relative estimation of the residual stresses in individual rail elements, measurements were made of the propagation velocity of acoustic waves along the head, web and base, showing that the residual stresses in the longitudinal direction of the rail are, as a rule, of a compressive nature for the head and tensile for the web.

Keywords: non-destructive testing, acoustoelasticity, rail, residual stresses.

Получено 10.04.2018