

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТОУПРУГОСТИ

© 2019 г. В.В. Муравьев<sup>1,2,\*</sup>, К.А. Тапков<sup>2,\*\*</sup>, С.В. Леньков<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>УдмФИЦ УрО РАН Физико-технический институт, Россия 426067 Ижевск, ул. Кирова, 132

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

E-mail: \*pmkk@istu.ru; \*\*izhjur@mail.ru; \*\*\*emp@udman.ru

Поступила в редакцию 02.08.2018; после доработки 14.09.2018;  
принята к публикации 21.09.2018

Приведены результаты экспериментального исследования внутренних напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах акустоупругим методом с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема поперечных волн. Рассмотрены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рельса при условии наличия критических напряжений в подошве рельса и данные экспериментального исследования остаточных напряжений в подошве рельса с использованием тензометрического метода. Анализ полученных результатов подтвердил разброс напряжений по различным сечениям в пределах одного рельса, а также выявил превышение критического уровня напряжений в поверхностном слое подошвы при сжимающих напряжениях в головке и шейке рельса. Предложен браковочный критерий для контроля акустоупругим методом, учитывающий требования ГОСТ 51685 как для случая прорезания шейки, так и при тензометрии подошвы.

*Ключевые слова:* акустоупругость, рельс, напряженно-деформированное состояние, моделирование.

DOI:10.1134/S01303082190100020

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжается процесс интенсификации железнодорожных грузоперевозок, увеличение пассажирского потока, а также взят курс на строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей [1], что вызывает необходимость повышения безопасности перевозок, важную роль в которых играет надежность железнодорожного пути и, в частности, основного элемента этой конструкции — рельса. Наличие критических дефектов в рельсах может привести к их разрушению во время прохождения подвижного состава, что, в свою очередь, может вызвать колоссальный экологический и материальный ущерб, а также человеческие жертвы.

В условиях отсутствия перегрузок наиболее частой причиной возникновения усталостных дефектов рельсов является высокий уровень остаточных напряжений, полученный при производстве и суммирующийся с температурными сезонными напряжениями и эксплуатационной поездной нагрузкой. В области зарождающихся острых трещин значения остаточных напряжений могут достигать предела текучести [2—4]. Эти факторы приводят к ускоренному развитию дефектов, в результате чего может значительно снизиться срок безопасной эксплуатации железнодорожного пути [5, 6]. На основании вышесказанного задача анализа остаточных напряжений в рельсах является одной из наиболее актуальных тем среди многочисленных проблем, связанных с эксплуатацией железнодорожного пути [7, 8]. Определение значений остаточных напряжений позволяет получить достоверную информацию о состоянии рельсов для дальнейшего прогнозирования цикла живучести рельса. В процессе производства остаточные напряжения возникают в процессе прокатки, дифференцированной термической обработки (из-за различной скорости охлаждения), деформации при рихтовке и правке.

Контроль уровня остаточных напряжений регламентируется ГОСТ 51685—2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». Согласно этому документу, значения остаточных напряжений оцениваются по косвенным признакам, а именно по расхождению паза в шейке рельса. Паз прорезается по середине шейки в отрезке рельса длиной 600 мм, при этом длина паза составляет 400 мм, ширина — 6 мм. После прорезания паза измеряется его расхождение (посредством измерения изменения высоты рельса). При превышении значения расхождения паза в 2 мм партия рельсов бракуется. Недостатком методики является то, что расхождение паза — это функция множества параметров, а именно напряжений в головке, шейке и подошве рельса. Распределение этих напряжений зависит от строгого соблюдения технологии изготовления рельса, при отклонении от которой может наблюдаться различное значение остаточных напряжений при одинаковом расхождении прорезанного паза [9, 10]. Такой контроль является выборочным и проводится лишь на одном участке рельса, хотя в других сечениях напряжения могут существенно различаться, применение же сплошного контроля таким методом невозможно.

Остаточные напряжения оцениваются также в подошве рельса согласно ГОСТ 51685 с помощью тензорезистивного метода один раз в течение 10 сут производства. Для этого вырезается метровый отрезок рельса, посередине которого со стороны подошвы на заранее отшлифованную поверхность устанавливается тензодатчик, фиксируется начальное значение, после чего вырезается темплет толщиной 20 мм. Значение напряжений после снятия связей, зафиксированное тензодатчиком, берется с обратным знаком. Недопустимым считается превышение уровня растягивающих напряжений более чем 250 МПа. Этот метод лишен многих недостатков косвенной оценки напряжений по расхождению паза, однако до сих пор применение его для сплошного контроля выходной продукции не представляется возможным. Кроме того, измерения являются локальными как по длине, так и по сечению элементов рельса.

Множество факторов, влияющих на остаточные напряжения в каждом элементе рельса, вызывает необходимость исследования распределения напряжений в отдельных сечениях разных выборок рельсов для разработки обоснованного браковочного критерия. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование уровня внутренних напряжений в элементах рельса и разных сечениях рельсов, а также связи уровня напряжений с требованиями ГОСТ 51685.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ

Экспериментальная оценка неразрушающим методом напряженно-деформированного состояния (НДС) рельсов проведена с использованием метода акустоупругости [11—13], в основе которого для одноосного НДС лежит измерение скорости двух поперечных акустических волн с взаимно-перпендикулярной поляризацией с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) способа ввода-приема волн. Согласно ГОСТ Р 52731 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений», значения напряжений рассчитываются по формулам акустоупругости для одноосного напряженного состояния. Значения остаточных напряжений в поперечном направлении рельса с учетом скорости продольной волны оказались несоизмеримо малы. Влияние текстурного фактора учли при измерениях фрагмента рельса, прошедшего термическую обработку в виде отжига с освобождением от внутренних напряжений. Обработка полученных осциллограмм производилась в программной среде ПРИНЦ [14].

Экспериментальная оценка остаточных напряжений в отрезках рельса, проведенная в [14], показала следующие значения продольных напряжений: –60 МПа по сечению рельса, –62 МПа в головке, –97 МПа в шейке рельса и 82 МПа в подошве рельса.

**Критерий допустимого уровня остаточных напряжений по расхождению паза.** Согласно ГОСТ 51585, при превышении значения расхождения паза в 2 мм рельс признается бракованным, что с учетом [15] соответствует следующему уровню напряжений: –77 МПа в головке рельса, –125 МПа в шейке рельса и 106 МПа в подошве рельса.

Для получения численного значения критерия браковки предложено использовать средневзвешенное интегральное значение напряжений в элементах рельса с учетом пути прохождения ультразвукового луча по разным элементам, имеющих разный уровень напряжений. Значение средневзвешенного напряжения, получаемого после обработки эхограмм, определим из выражения [15]

$$\sigma_{\text{int}} = \frac{\sigma_h \cdot h_h + \sigma_w \cdot h_w + \sigma_b \cdot h_b}{h_r}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{int}}$  — значение напряжений, получаемых при прозвучивании со стороны поверхности катания рельса, МПа;  $\sigma_h$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_b$  — напряжения в головке, шейке и подошве рельса соответственно, МПа;  $h_h$ ,  $h_w$ ,  $h_b$  — путь, проходимый волной в вертикальном сечении по головке, шейке и подошве рельса соответственно, мм;  $h_r$  — общая высота рельса (для Р65 принимает значение 180 мм).

Для формирования поперечных волн использована методика на основе электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема волн с помощью прибора СЭМА, структурная схема которого, расположение преобразователей и ход лучей представлены на рис. 1, основные технические характеристики приведены в табл. 1 [13].



Рис. 1. Схема установки электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП) на головке рельса и ход лучей.

Таблица 1

## Основные технические характеристики структуроскопа СЭМА

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения временных интервалов, мкс	30—1000
Погрешность измерения времен прихода импульсов, нс	0,5
Материал контролируемых объектов	Ферромагнитные стали
Толщина контролируемого объекта, мм	20—500
Амплитуда генератора зондирующих импульсов, кВ	2,0
Рабочая частота, МГц	2,5
Полоса пропускания усилителя, МГц	0,6—6,6
Коэффициент усиления, дБ	66

Уровень средневзвешенных напряжений, получаемый методом акустоупругости с помощью структуроскопа СЭМА при прозвучивании со стороны головки, для рельса с критическим уровнем остаточных напряжений оценивается в  $-77$  МПа с погрешностью 3 МПа [15, 16]. Следовательно, условие  $|\sigma_{int}| > 80$  МПа обозначает превышение уровня остаточных напряжений в шейке рельса согласно ГОСТ 51685.

**Экспериментальное исследование остаточных продольных напряжений в рельсах и анализ результатов.** Исследование напряженного состояния отрезков рельсов проводилось с использованием структуроскопа СЭМА (см. рис. 1) [13, 16] методом акустической тензометрии согласно ГОСТ Р 52731. Результаты экспериментального исследования отрезков рельсов длиной 1 м представлены в табл. 2. Измерения проводились в сечениях, находящихся на различном расстоянии от центра рельса ( $-250,0$  и  $250$  мм). Погрешность измерений составила  $\pm 5$  МПа.

Таблица 2

## Внутренние напряжения в метровых отрезках рельсов

Рельс, №	Уровень напряжений по сечениям рельса при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки, МПа		
	$-250$ мм	$0$ мм	$250$ мм
1	$-38$	$-19$	$-36$
2	$-56$	$-39$	$-63$
3	$-73$	$-47$	$-58$
4	$-47$	$-55$	$-47$
5	$-30$	$-40$	$-35$
6	$-31$	$-45$	$-57$
7	$-83$	$-83$	$-91$
8	$-83$	$-90$	$-3$
9	$-46$	$-74$	$-58$
10	$-41$	$-64$	$-76$
11	$-62$	$-80$	$-65$

Дополнительно выполненные экспериментальные исследования 8 отрезков рельсов длиной  $0,5$  м представлены в табл. 3. Измерения проводились в двух сечениях, находящихся на различном расстоянии от торца рельса ( $70$  и  $250$  мм). Погрешность измерений составила  $\pm 5$  МПа.

Видно, что уровень остаточных напряжений по разным сечениям одного отрезка рельса имеет различные значения, при этом какой-либо зависимости между распределением напряжений и расстоянием от торца (или центра рельса) не установлено. Для наглядности результаты экспериментального исследования представлены на рис. 2.

Таблица 3

## Внутренние напряжения в полуметровых отрезках рельсов

Рельс, №	Уровень напряжений по сечениям рельса при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки, МПа	
	70 мм	250 мм
1	-31	-19
2	-57	-36
3	-87	-93
4	-16	-5
5	-50	-13
6	-13	-5
7	-34	-36
8	-54	-27

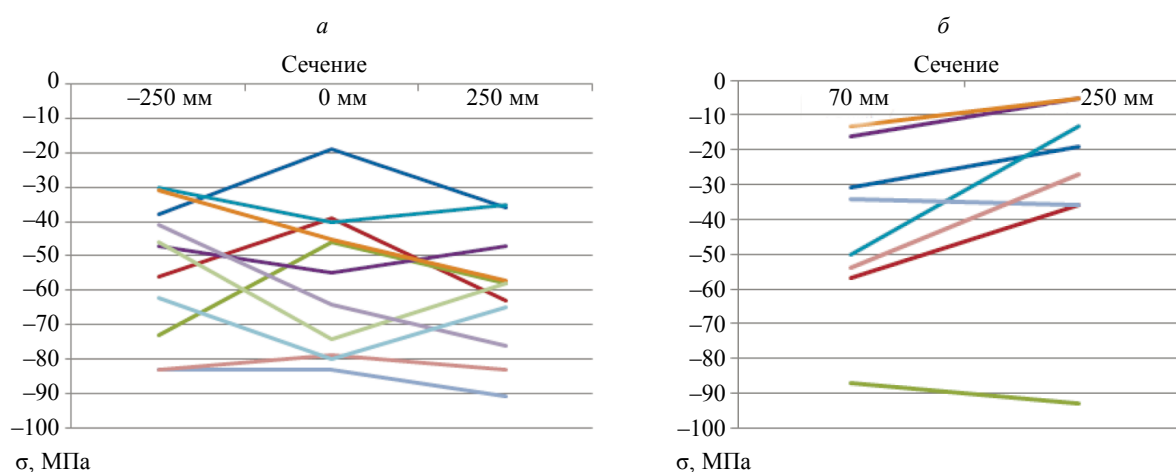


Рис. 2. Распределение напряжений по сечениям в метровых (а) и полуметровых (б) отрезках рельсов.

Анализ результатов измерений по отрезкам длиной 1 м № 1—3 показал, что значения напряжений по центру рельса (0 мм от центра) меньше значений в удаленных сечениях (-250, 250 мм), несмотря на то, что при освобождении связей (после вырезки отрезка) вблизи торца значения напряжений должны быть существенно меньше, чем в центральном сечении. В то же время по метровым отрезкам № 4—6, 9, 11 зависимость обратна обозначенной, в отрезках же № 7, 8, 10 наличие корреляции между удаленностью сечения и значениями напряжений не обнаружено. Таким образом, существенное расхождение значений уровня напряжений по различным сечениям рельса обусловлено наличием наследования распределения в исходном рельсе.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ КРИТИЧЕСКИХ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДОШВЕ РЕЛЬСА

Цель моделирования заключалась в оценке напряженного состояния элементов рельса при критическом уровне остаточных напряжений в подошве рельса согласно ГОСТ 51685 (250 МПа). Моделирование произведено методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics. В качестве начальных условий при моделировании были выбраны напряжения в поверхностном слое подошвы (250 МПа), неподвижность середины сечения рельса и экспериментальное соотношение напряжений между элементами рельса [17]. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Средневзвешенные значения напряжений по элементам рельса и всего его сечения при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки сведены в табл. 4. Таким образом, критический уровень остаточных напряжений в подошве в 250 МПа, полученный тензометрическим методом, достигается при значении измеренных методом акустоупругости остаточных напряжений по сечению рельса в -52 МПа.

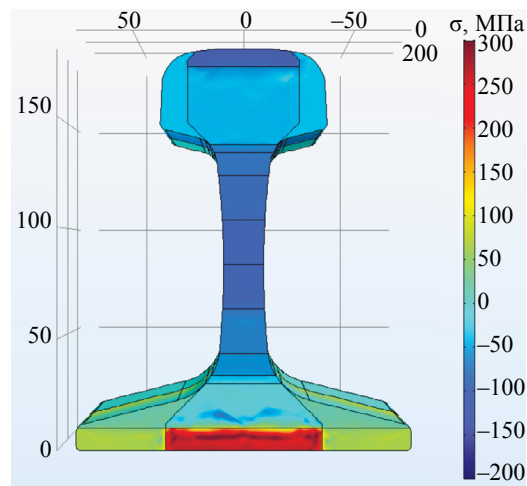


Рис. 3. Распределение напряжений в рельсе при растягивающих напряжениях в подошве (250 МПа).

Таблица 4

Средневзвешенные значения напряжений в элементах рельса, полученные моделированием, и выбранном значении напряжений в поверхностном слое подошвы 250 МПа

Фрагмент рельса	Напряжение, МПа
Сечение рельса	-52
Головка	-51
Шейка	-90
Подошва	89

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОДОШВЫ РЕЛЬСОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно ГОСТ 51685, в метровых отрезках рельсов измерен уровень остаточных напряжений в подошве тензометрическим методом, после чего полученные значения остаточных напряжений были сопоставлены со значениями напряжений, получаемых при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки в середине отрезка рельса (табл. 5). Погрешность измерений структуроскопа СЭМА составила  $\pm 3$  МПа.

Таблица 5

#### Результаты измерений внутренних напряжений двумя методами

Рельс, №	Напряжения при установке ЭМА- преобразователя со стороны головки рельса, МПа	Напряжения, полученные при измерении тензорезистором со стороны подошвы, МПа
1	-19	284
2	-39	256
3	-45	268
4	-47	265
5	-55	261
6	-79	248
7	-80	227
8	-83	249
9	-90	195

График зависимости между напряжениями представлен на рис. 4. Анализ полученных результатов показал, что достижение критического значения уровня растягивающих остаточных напря-

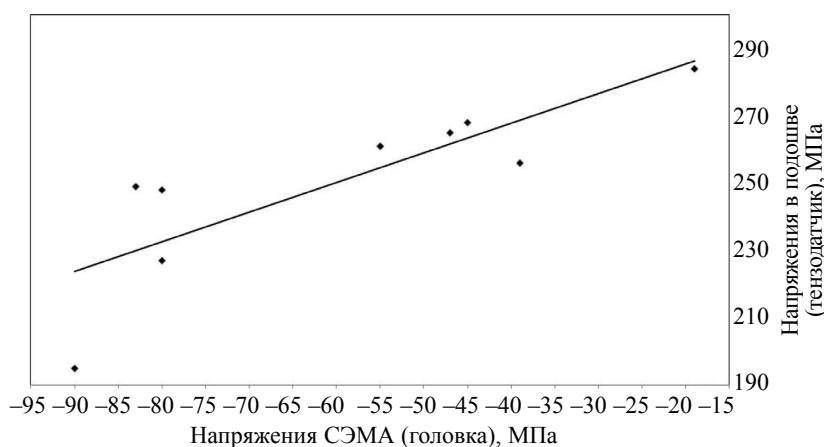


Рис. 4. Экспериментальная зависимость между напряжениями при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки и тензометрическим методом на подошве рельса.

жений в подошве происходит при значении  $-54$  МПа при установке ЭМА-преобразователя со стороны головки, что коррелирует с результатами, полученными при моделировании. Следовательно, значение напряжений, по модулю меньше чем  $54$  МПа (при прозвучивании сечения рельса), свидетельствует о превышении критического уровня остаточных напряжений в подошве.

### ВЫВОДЫ

1. По результатам моделирования растягивающих напряжений в подошве в отрезке дифференцированно термоупрочненного рельса получено критическое значение сжимающих напряжений по сечению рельса  $-52$  МПа. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями внутренних напряжений рельсов, критическое напряжение  $250$  МПа в подошве (браковочный критерий) соответствует уровню сжимающих напряжений от  $-54$  МПа, полученных структуроскопом СЭМА.

2. Характер распределения остаточных напряжений и их значения могут значительно различаться даже в пределах одного рельса, в связи с чем по различным сечениям одного рельса могут наблюдаться различное расхождение паза и различный уровень напряжений в подошве рельса, что не учитывается в методике ГОСТ 51685.

3. С учетом смоделированного уровня критических напряжений при прозвучивании рельса по расхождению паза (условие  $|\sigma_{int}| < 80$  МПа) предложен двухсторонний браковочный критерий, учитывающий одновременно критический уровень напряжений по расхождению паза и критический уровень напряжений в поверхностном слое подошвы:  $52 \text{ МПа} < |\sigma_{int}| < 80 \text{ МПа}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган А.Я., Савин А.В. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути // Вестник ВНИИЖТ. 2017. № 1 (Т. 76). С. 3—9. DOI: 10.21780/2233-9731-2017-76-1-3-9.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
3. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Разрушение металлов / Отв. ред. Л.И. Леонтьев. М.: Наука, 2004. 400 с.
4. Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Кареев А.Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 63—68.
5. Золотарский А.Ф., Раузин Я.Р., Шур Е.А., Великанов А.В., Мелентьев Л.П., Скворцов О.С., Генкин И.З. Термически упрочненные рельсы / Под ред. А.Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1986. 264 с.
6. Бехер С.А., Коломеец А.О. Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации // Изв. Вузов. Строительство. 2016. № 3. С. 110—118.
7. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н. и др. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии // Изв. Вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 103—109.
8. Сакало А.В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в колесе вагона с использованием конечно-элементных фрагментов на упругом основании // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 44—49.

9. Хлыст С.В., Кузьмиченко В.М., Резанов В.А., Борц А.И., Шур Е.А. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 14—20. ISSN 2223—9731.
10. Покровский А.М., Третьяков Д.Н. Численное моделирование температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 07. С. 1—13.
11. Анисимов В.А., Каторгин Б.И., Куценко А.Н. и др. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4 в 3 кн. Кн. 1. Акустическая тензометрия. М.: Машиностроение, 2004. 736 с.
12. Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 51—60.
13. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34—37.
14. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159 — 166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.
15. Муравьев В.В., Тапков К.А., Ленков С.В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 3—9.
16. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гущина Л.В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.
17. Тапков К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния дифференцированно термоупрочненных рельсов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 2. С. 78—83. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.
-