

УДК 669.14-412:625.2.012.2:006.354

Кандидаты техн. наук Г. И. БРЮНЧУКОВ, А. С. РАЗУМОВ, А. В. СУХОВ, инженеры А. В. ЗОРИН, Р. А. ИЛЬНИХ, В. В. БРЕКСОН

## Лабораторные и стендовые испытания бандажей повышенной прочности и трещиностойкости

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки и комплексных испытаний опытных локомотивных бандажей марки «Н» из среднелегированной стали повышенной прочности и трещиностойкости, предназначенных для применения под грузовыми электровозами нового поколения с асинхронным тяговым приводом серий 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭС6.

Опытные образцы бандажей из стали марки «Н» прошли лабораторные и стендовые испытания в ОАО «ВНИИЖТ», включая анализ механических свойств в рабочем слое, распределение твердости и микроструктуры по сечению, оценку хладостойкости стали, определение статической вязкости разрушения (трещиностойкости)  $K_{IC}$  и циклической вязкости разрушения (живучести)  $K_{fc}$  бандажей, а также анализ их напряженного состояния.

На основании положительных результатов предварительных и приемочных испытаний опытной партии бандажей марки «Н» принято решение о проведении их подконтрольной эксплуатации под электровозами серии 2ЭС10 на Свердловской железной дороге.

**Ключевые слова:** бандаж локомотивный; среднелегированная сталь; механические свойства; твердость; вязкость разрушения; хладостойкость; напряженное состояние

С целью повышения ресурса и надежности локомотивных бандажей в эксплуатации под грузовыми электровозами нового поколения серий 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭС6 специалисты ОАО «ВНИИЖТ» разработали новую марку среднелегированной стали для изготовления бандажей, имеющих повышенную твердость и износостойкость в сочетании с высокой вязкостью и трещиностойкостью. Данная работа была проведена совместно с ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и включала в себя разработку технических условий на изготовление бандажей, в том числе требований к химическому составу и механическим свойствам стали, апробацию режимов термической обработки прокатанных бандажей, изготовление опытных образцов бандажей, а также их лабораторные и стендовые испытания с оценкой комплекса свойств.

Предварительно проведенные исследования [1] показали, что с точки зрения комплекса получаемых механических свойств бандажа наиболее перспективной является никель-хром-молибденовая сталь с содержанием никеля ~2%, термически обработанная на структуру отпущенного мартенсита с высокими характеристиками твердости и прочности и значительным запасом по ударной вязкости.

Требования к химическому составу среднелегированной стали для бандажей повышенной прочности и трещиностойкости марки «Н» по разработанным техническим условиям ТУ 0941–309оп — 01124323 — 2014 представлены в табл. 1. Основные требования к комплексу механических свойств опытной бандажной стали, установленные с точки зрения обеспечения повышенного ресурса и надежности бандажей, приведены в табл. 2.

Заданные свойства должны быть обеспечены в бандажах из опытной марки стали при существующей технологии термической обработки бандажей на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (закалка методом погружения стопы бандажей в колодец с водой или индивидуальная закалка на столах с возможностью управления режимами). Учитывая, что стали данного класса закаляются, как правило, в масло, реже в воду [2, 3], режим термической обработки с учетом возможностей завода-изготовителя должен включать закалку в предварительно подогретую воду (не ниже 50 °С) с последующим высоким отпуском.

Отработка режимов термической обработки опытной стали проводилась в производственных условиях ОАО «ЕВРАЗ НТМК» на прокатанных бандажах типоразмера 1060×143×98 мм (электровозные) методом погружения стопы бандажей в колодец с водой и методом индивидуальной закалки бандажей на

Таблица 1

Химический состав стали

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	S+P
«Н»	0,38–0,48	0,25–0,45	0,70–0,90	0,65–0,85	1,90–2,10	0,15–0,25	0,07–0,16	0,020	0,030	0,040

столах с вариациями основных параметров в следующих пределах:

- температура нагрева под закалку от 850 до 880 °С;
- температура воды при закалке от 50 до 80 °С;
- время охлаждения бандажей при закалке от 250 до 300 с;
- температура отпуска бандажей от 550 до 630 °С.

После нахождения оптимального режима термической обработки, обеспечивающего получение в рабочем слое бандажа глубиной 50 мм микроструктуры отпущенного мартенсита с наилучшим сочетанием прочностных и пластических характеристик, была изготовлена опытная партия бандажей марки «Н» для проведения комплексных лабораторных и стендовых испытаний. Испытания опытных бандажей были проведены в ОАО «ВНИИЖТ» и включали в себя определение механических свойств в рабочем слое бандажа, анализ распределения твердости и микроструктуры по сечению, оценку хладостойкости стали, определение трещиностойкости  $K_{1C}$  и живучести  $K_{Jc}$  бандажей, а также анализ их напряженного состояния.

Фактический уровень механических свойств при растяжении, твердости и ударной вязкости опытных бандажей представлен в табл. 3.

Анализ данных в табл. 3 показывает, что опытные бандажи марки «Н» существенно превосходят стандартные бандажи марок «2» и «4» по прочностным характеристикам, имеют значительный запас пластичности и ударной вязкости и соответствуют требованиям ТУ 0941–309оп — 01124323 — 2014 по комплексу механических свойств.

Для оценки распределения твердости по сечению бандажа были проведены дополнительные измерения твердости в направлении от поверхности катания к посадочной поверхности бандажа с шагом 10 мм (рис. 1). Как видно из рис. 1, твердость бандажа находится на высоком уровне практически по всему сечению. Твердость рабочего слоя бандажа в сечении круга катания находится в диапазоне от 385 НВ вблизи поверхности катания до 370 НВ на глубине 50 мм. Выявленный характер распределения твердости соответствует условиям двустороннего охлаждения бандажа при закалке методом погружения стопы бандажей в колодец с водой [4, 5]. Повышенная твердость в рабочем слое бандажа и реализация ее минимального градиента по сечению (<15 НВ) обеспечат высокую стойкость бандажа к износу и повреждаемости контактно-усталостными дефектами в течение всего срока службы [6].

Анализ микроструктуры бандажей проводили на инвертированном микроскопе Axio Observer A1m на поперечных шлифах, вырезанных на различном расстоянии от поверхности катания по всей толщине бандажа. Установлено, что на глубине до 30 мм от поверхности катания микроструктура бандажа состоит исключительно из мелкоигльчатого отпущенного

Таблица 2

Требования к механическим свойствам бандажей

Марка стали	Временное сопротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость, НВ		Ударная вязкость КСЧ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре	
				на глубине 20 мм	на гребне	+20 °С	-60 °С
				не менее		не менее	
«Н»	1060	11	20	335	400	40	35

Примечания. 1. Статическая вязкость разрушения (трещиностойкость)  $K_{1C}$  бандажей должна быть не менее 75 МПа·м<sup>1/2</sup>.  
2. Циклическая вязкость разрушения (живучесть)  $K_{Jc}$  бандажей должна быть не менее 70 МПа·м<sup>1/2</sup>.

Таблица 3

Фактические механические свойства опытных бандажей

Марка стали	Временное сопротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость, НВ		Ударная вязкость КСЧ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре	
				на глубине 20 мм	на гребне	+20 °С	-60 °С
				не менее		не менее	
«Н»	1150–1200	17–19	45–52	360–380	365–385	48–62	158–170

Примечание. В соответствии с требованием ГОСТ 398–2010 значение ударной вязкости КСЧ (-60 °С) определяют на образцах с надрезом радиусом 5 мм.

мартенсита (рис. 2, а, б) (аналогично на расстоянии до 25 мм от посадочной поверхности — рис. 2, д). Начиная с глубины 30 мм и до 75 мм от поверхности катания (середины сечения бандажа) доля отпущенного мартенсита несколько снижается и в структуре появляются отдельные участки бейнита (рис. 2, в, г).

Таким образом, повышенные прочностные характеристики в сочетании с высокой пластичностью и вязкостью, а также минимальный градиент твердости по сечению бандажей из стали марки «Н» получают за счет реализации по всей глубине рабочего

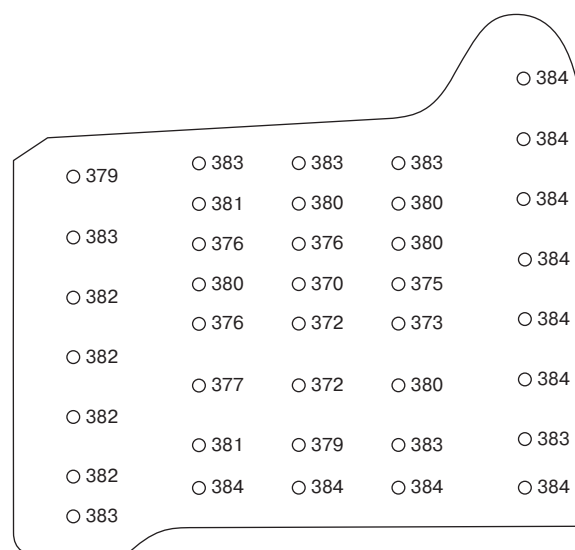


Рис. 1. Распределение твердости по сечению бандажа марки «Н»

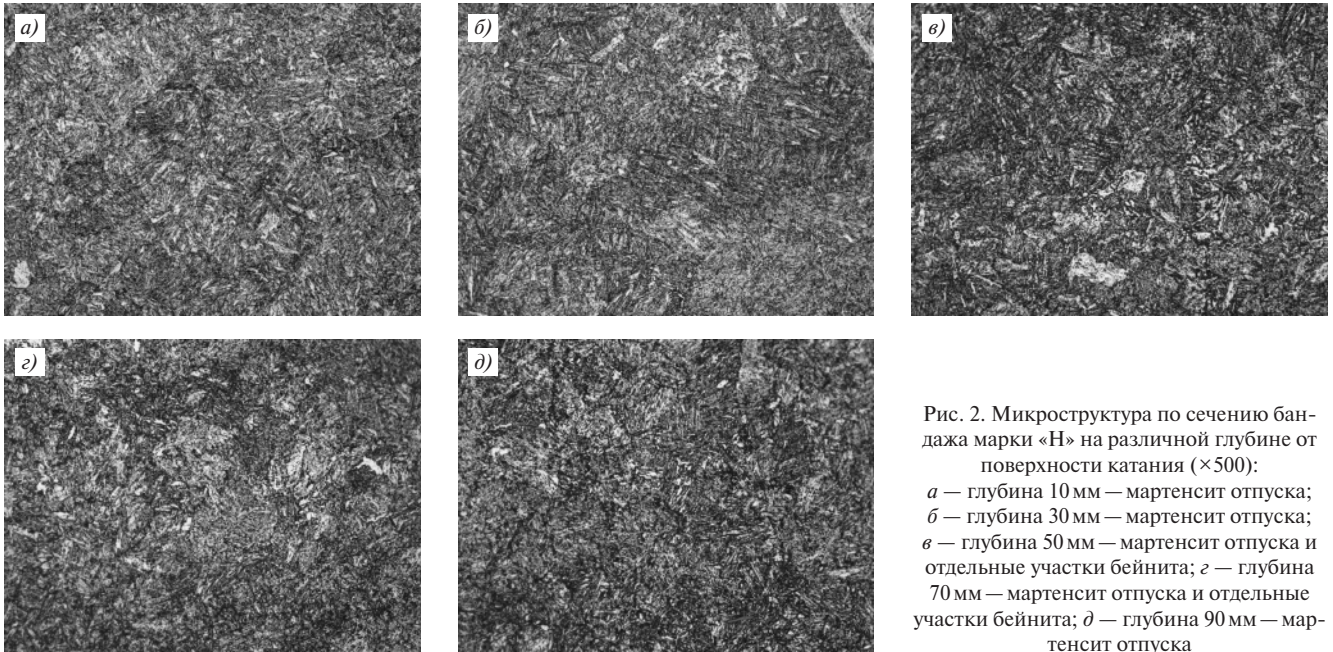


Рис. 2. Микроструктура по сечению бандажа марки «Н» на различной глубине от поверхности катания ( $\times 500$ ):  
 а — глубина 10 мм — мартенсит отпуска; б — глубина 30 мм — мартенсит отпуска; в — глубина 50 мм — мартенсит отпуска и отдельные участки бейнита; г — глубина 70 мм — мартенсит отпуска и отдельные участки бейнита; д — глубина 90 мм — мартенсит отпуска

слоя тонкодисперсной структуры отпущенного мартенсита с незначительным количеством бейнитных включений.

Определение ударной вязкости КСУ в диапазоне положительных и отрицательных температур (оценку хладостойкости стали) опытных бандажей проводили на сериях образцов типа 1 по ГОСТ 9454–78 в диапазоне температур от +20 до  $-60^{\circ}\text{C}$  с шагом  $20^{\circ}\text{C}$  (по 6 образцов при каждой температуре). Схема вырезки образцов из черного бандажа — в соответствии с ГОСТ 398–2010.

Охлаждение образцов до пониженных температур осуществлялось в морозильной камере Yokogawa TG-707 НРМ, а разрушение падающим грузом — на маятниковом копре Amsler с максимальной энергией удара 300 Дж.

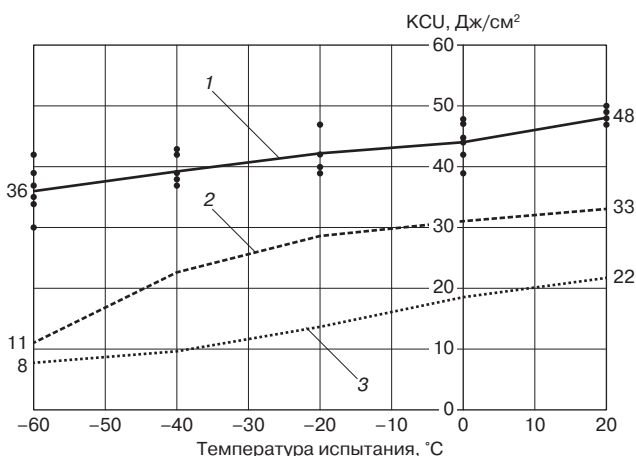


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости КСУ от температуры:  
 1 — бандажная сталь марки «Н»; 2 — бандажная сталь марки «2»;  
 3 — бандажная сталь марки «4»

На рис. 3 представлена зависимость ударной вязкости КСУ от температуры (серийная кривая) бандажной стали марки «Н». Для сравнения на рис. 3 дополнительно приведены аналогичные серийные кривые бандажных сталей марок «2» и «4» по ГОСТ 398–2010.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что бандажная сталь марки «Н» имеет повышенную хладостойкость и менее склонна к охрупчиванию при понижении температуры в сравнении с серийными бандажными сталями марок «2» и «4». При понижении температуры от +20 до  $-60^{\circ}\text{C}$  показатель ударной вязкости КСУ стали марки «Н» снижается с 48 до 36 Дж/см<sup>2</sup>, т. е. всего на 25%, в то время как ударная вязкость КСУ серийных бандажных сталей в аналогичных условиях снижается в 3 раза. Кроме того, даже при минимальной температуре испытания  $-60^{\circ}\text{C}$  уровень ударной вязкости КСУ бандажей марки «Н» выше, чем аналогичный показатель бандажей марок «2» и «4», полученный при комнатной температуре +20 °С.

Испытания на циклическую вязкость разрушения (живучесть)  $K_{fc}$  проводили в соответствии с типовой методикой ТМ 37-14-09 на полнопрофильных сегментах из бандажа длиной 600 мм. Испытание сегментов проводили на гидравлическом пульсаторе Schenck 1000 kN (рис. 4) методом циклического нагружения по схеме трехточечного изгиба, воспроизводящей развитие поперечной усталостной трещины в гребне бандажа с последующим его изломом. Величина максимальной нагрузки цикла составляла 550 кН с коэффициентом асимметрии  $R = 0,1$ . Частота действия циклической нагрузки составляла 300 циклов в минуту (5 Гц).

Общий вид поверхности излома сегмента бандажа после испытания приведен на рис. 5 и характеризуется



Рис. 4. Испытание сегмента бандажа на живучесть

значительной длиной усталостной трещины (зона усталостного развития трещины занимает 50–55% площади всего сечения излома, что свидетельствует о высокой живучести бандажа с трещиной).

По результатам испытаний значение циклической вязкости разрушения  $K_{fc}$  опытного бандажа марки «Н» составило 103,7 МПа·м<sup>1/2</sup>, что удовлетворяет требованиям технических условий. Полученное значение циклической вязкости разрушения опытного бандажа марки «Н» эквивалентно аналогичному показателю бандажей марки «2» и на 35% выше, чем бандажей марки «4» (рис. 6).

Определение статической вязкости разрушения (трещиностойкости)  $K_{IC}$  проводили на плоских прямоугольных образцах типа 4 с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб в соответствии с ГОСТ 25.506–85. Схема вырезки образцов из черного бандажа представлена на рис. 7.

Испытание образцов проводили на сервогидравлическом пульсаторе Biss 200 кН при статическом нагружении по схеме внецентренного растяжения.

По результатам испытаний значение статической вязкости разрушения  $K_{IC}$  опытного бандажа из стали марки «Н» составило 112,8 МПа·м<sup>1/2</sup>, что соответствует требованиям технических условий. Полученное значение статической вязкости разрушения опытного

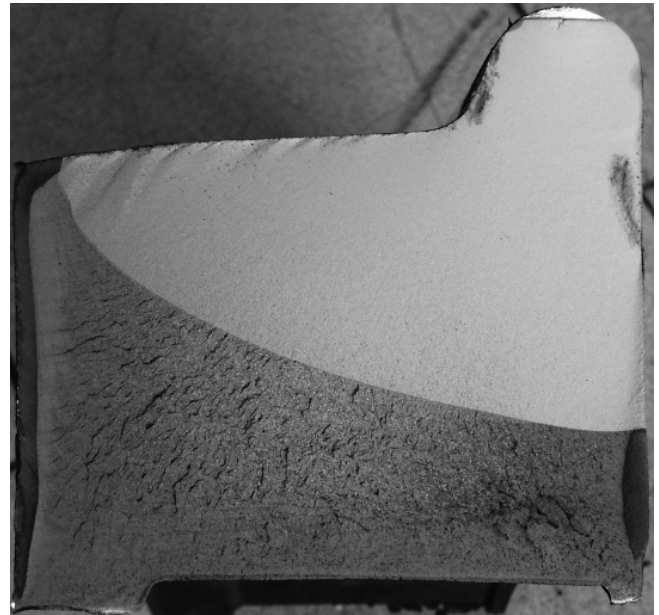


Рис. 5. Общий вид поверхности излома сегмента бандажа марки «Н»

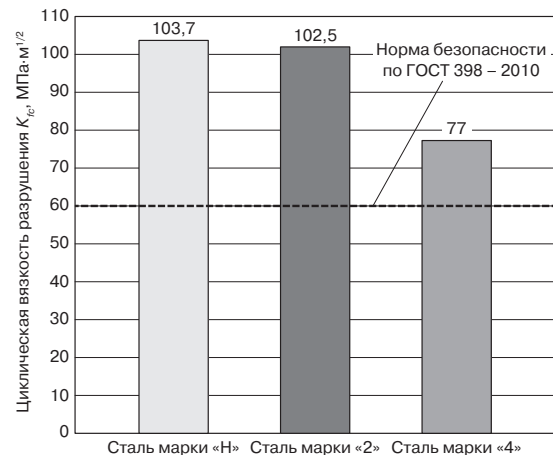


Рис. 6. Сравнительные результаты испытания бандажей на живучесть

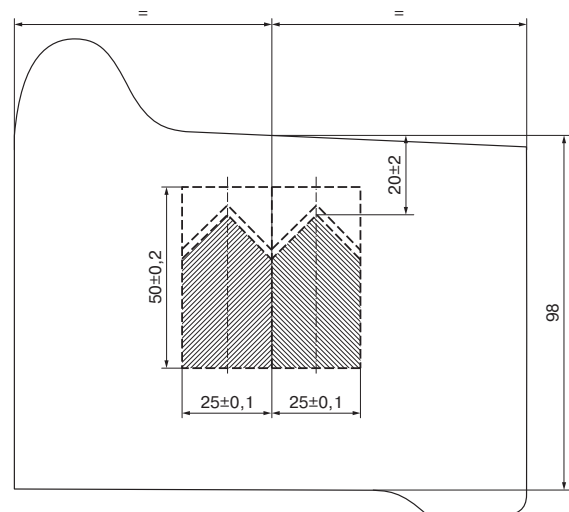


Рис. 7. Схема вырезки образцов из бандажа

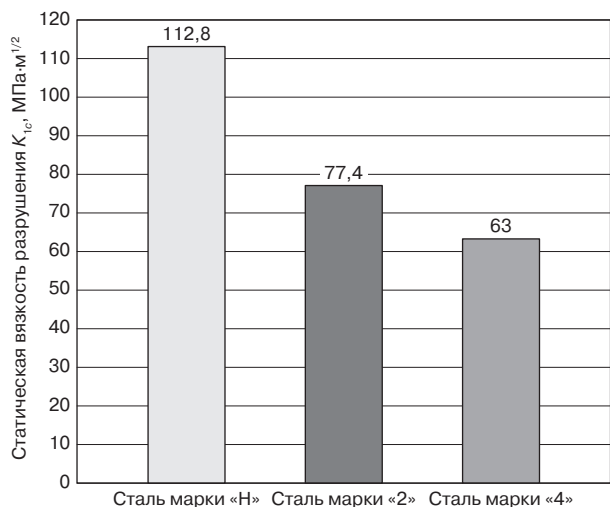


Рис. 8. Сравнительные результаты испытания бандажей на трещиностойкость

бандажа марки «Н» практически в полтора раза выше аналогичного показателя бандажей марки «2» и на 80% выше, чем бандажей марки «4» (рис. 8).

Измерение величины остаточных напряжений на поверхности бандажа проводилось методом тензометрирования деформаций (изменений напряженно-состояния), возникающих при его механической разрезке [7, 8]. Для оценки напряженного состояния был отобран черновой бандаж марки «Н» типоразмера 1060×143×98 мм. Для измерения напряжений применялись одиночные тензорезисторы с измерительной базой 6,0 мм. Двухкомпонентные розетки тензорезисторов для определения двухосного напряженного состояния на поверхностях бандажа составлялись из двух одиночных тензорезисторов.

На поверхностях бандажа в одном радиальном сечении по периметру устанавливалось 18 двухкомпонентных розеток:

- розетка № 1 — на вершине гребня бандажа;
- розетки № 2–5 — на поверхности катания;
- розетки № 6–9 — на наружной боковой поверхности;
- розетки № 10–14 — на посадочной поверхности;
- розетки № 15–18 — на внутренней боковой поверхности.

В каждой двухкомпонентной розетке один тензорезистор был ориентирован по нормали к плоскости поперечного сечения бандажа и один тензорезистор — параллельно плоскости поперечного сечения бандажа. Таким образом, данная схема установки тензорезисторов позволяет определять окружные остаточные напряжения по всему периметру бандажа: осевые остаточные напряжения — на поверхности катания и посадочной поверхности, радиальные остаточные напряжения — на боковых поверхностях бандажа.

Работа по измерению напряжений в бандаже проводилась в соответствии со специальной методикой и включала в себя подготовку поверхностей бандажа, установку тензорезисторов в заданных точках, поэтапную разрезку бандажа с последовательным снятием показаний тензорезисторов и расчет остаточных напряжений с построением соответствующих эпюр. После этого проводили анализ построенных эпюр и определение зон реализации максимальных (пиковых) уровней напряжений на поверхностях бандажа.

Снятие показаний тензорезисторов на целом бандаже (начальный замер) и после его разрезки на отдельные фрагменты (конечный замер) проводилось

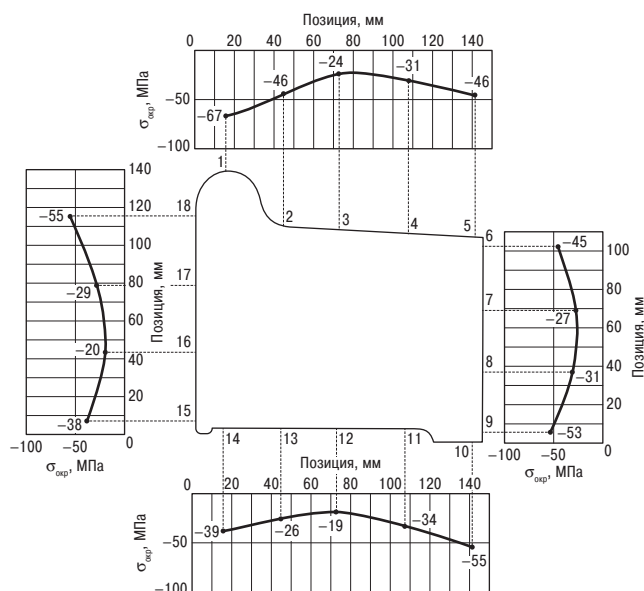


Рис. 9. Эпюры окружных остаточных напряжений на поверхности бандажа марки «Н»

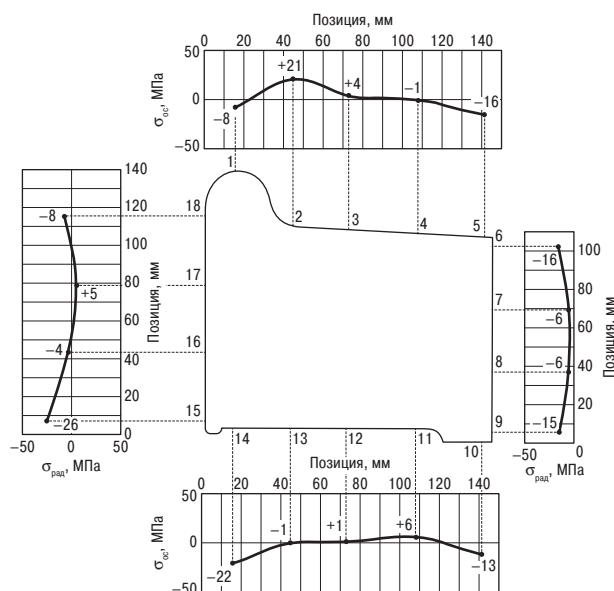


Рис. 10. Эпюры осевых и радиальных остаточных напряжений на поверхности бандажа марки «Н»

с помощью устройства SPIDER 8 производства фирмы HBM, соединенного с ноутбуком. Значения остаточных напряжений в точках 1–18 на поверхности бандажа рассчитывались как разность показаний соответствующего тензорезистора на конечном и начальном этапах измерения, взятая с обратным знаком (поскольку релаксация сжимающих напряжений сопровождается деформацией растяжения и наоборот).

Эпюры распределения окружных, осевых и радиальных остаточных напряжений на поверхности бандажа представлены на рис. 9 и 10. Согласно полученным эпюрам, окружные напряжения являются сжимающими по всей поверхности бандажа и находятся на уровне от –19 МПа на посадочной поверхности до –67 МПа на вершине гребня. Осевые и радиальные напряжения находятся в пределах от –26 МПа на внутренней боковой поверхности в зоне упорного бурта до +21 МПа на поверхности катания в зоне выкружки гребня. На эпюрах отсутствуют пики резкой концентрации напряжений.

В целом полученные эпюры распределения остаточных напряжений на поверхности бандажа соответствуют применяемой схеме закалки методом охлаждения стопы бандажей в колодце с водой [9, 10]. При этом уровень окружных, осевых и радиальных остаточных напряжений, а также величина сходимости после радиальной разрезки бандажа марки «Н» (0,4 мм) существенно ниже, чем у бандажей из серийных марок стали «2» и «4», т. е. бандаж марки «Н» характеризуется пониженной интенсивностью напряженного состояния.

**Заключение.** В результате разработки и комплексных испытаний опытных бандажей повышенной прочности и трещиностойкости из среднелегированной стали марки «Н» со структурой отпущенного мартенсита установлено следующее.

1. Лабораторные испытания показали, что опытные бандажи из стали марки «Н» обладают высоким комплексом прочностных характеристик с запасом ударной вязкости (твердость рабочего слоя 360–380 НВ, предел прочности 1150–1200 МПа и ударная вязкость KCU (+20 °С) не менее 45 Дж/см<sup>2</sup>).

2. Анализ ударной вязкости KCU бандажной стали марки «Н» в диапазоне положительных и отрицательных температур показал, что она имеет повышенную хладостойкость и низкую склонность к охрупчиванию вплоть до температуры –60 °С.

3. Стендовые испытания показали, что бандажи марки «Н» имеют высокие характеристики трещиностойкости и усталостной выносливости (трещиностойкость  $K_{IC} = 112,8$  МПа·м<sup>1/2</sup>, живучесть  $K_{fc} = 103,7$  МПа·м<sup>1/2</sup>) и существенно превосходят по данным показателям серийные бандажные стали.

4. Распределение остаточных напряжений на поверхности бандажей из стали марки «Н» характеризу-

ется пониженной интенсивностью напряженного состояния, что связано со структурной однородностью и минимальным градиентом твердости по сечению.

5. На основании положительных результатов проведенных ОАО «ВНИИЖТ» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» предварительных и приемочных испытаний опытной партии бандажей марки «Н» начиная с 3-го квартала 2015 г. проводится их подконтрольная эксплуатация под электровозами серии 2ЭС10 на Свердловской железной дороге.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка стали для локомотивных бандажей повышенной прочности и трещиностойкости / Г.И. Брюнчуков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 4. С. 12–18.
2. Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. Технология термической обработки стали. М.: Металлургия, 1986. 424 с.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1993. 448 с.
4. Гусев С.А., Бухиник Е.Н., Черевик Ю.И. Современное состояние и перспективы обеспечения долговечности термически упрочненных бандажей // Черная металлургия. Наука. Технология. Производство: сб. науч. тр. М.: Металлургия, 1989. С. 352–355.
5. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. М.: Интекст, 2002. 208 с.
6. Школьник Л.М., Марков Д.П. Прокаливаемость стали как резерв повышения износостойкости бандажей и колес // Вестник ВНИИЖТ. 1990. № 8. С. 32–36.
7. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
8. Финк К., Рорбах Р. Измерение напряжений и деформаций / пер. с нем. Ю.Ф. Красонтовича; под ред. Н.И. Пригоровского. М.: Машиностроение, 1961. 536 с.
9. Структурное и напряженно-деформированное состояние бандажей колес локомотивов при закалке / С.Н. Киселев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 1. С. 42–46.
10. Брюнчуков Г.И., Марков Д.П. Экспериментальная оценка распределения остаточных напряжений в локомотивных бандажах // Вопросы развития железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики: сб. науч. тр. М.: Интекст, 2007. С. 180–188.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БРЮНЧУКОВ Григорий Иванович**,  
заведующий лабораторией, ОАО «ВНИИЖТ».  
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.  
Тел.: (499) 260-45-23.  
E-mail: steelmaker3@mail.ru

**РАЗУМОВ Андрей Сергеевич**,  
ведущий научный сотрудник, ОАО «ВНИИЖТ».  
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.  
Тел.: (499) 260-43-92.  
E-mail: razumov78@yandex.ru

**СУХОВ Алексей Владимирович**,  
заведующий отделением, ОАО «ВНИИЖТ».  
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.  
Тел.: (499) 260-43-90.  
E-mail: A\_Sukhov@mail.ru

**ЗОРИН Алексей Викторович**,  
калибровщик, ОАО «ЕВРАЗ НТМК».  
622025, Свердловская обл., Нижний Тагил,  
ул. Metallургов, д. 1.  
Тел.: (3435) 49-05-18.  
E-mail: aleksey.zorin@evraz.com

**ИЛЬИНЫХ Роман Александрович**,  
ведущий инженер-технолог, ОАО «ЕВРАЗ НТМК».  
622025, Свердловская обл., Нижний Тагил,  
ул. Metallургов, д. 1.

Тел.: (3435) 49-06-31.  
E-mail: Roman.Ilinykh@evraz.com

**БРЕКСОН Виталий Вильямович**,  
начальник Департамента конструкторских  
разработок и исследований,  
ООО «Уральские локомотивы».  
624090, Свердловская обл., Верхняя Пышма,  
ул. Парковая, д. 36.  
Тел.: (343) 379-41-32.  
E-mail: brekson@ulkm.ru

## Laboratory and Rig Tests of High-Strength and High Crack Resistance Wheel Tyres

**Grigoriy I. Bryunchukov**, Candidate of Technical Science, Laboratory Chief, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT).

10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 260 4523. E-mail: steelmaker3@mail.ru

**Andrey S. Razumov**, Candidate of Technical Science, Leading Researcher, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 260 4392. E-mail: razumov78@yandex.ru

**Alexey V. Sukhov**, Candidate of Technical Science, Head of Department for Transport Related Material Technology, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 260 4390. E-mail: A\_Sukhov@mail.ru

**Alexey V. Zorin**, Roll Designer, JSC "EVRAZ NTKM". 1, Metallurgov str., 622025, Nizhniy Tagil, Sverdlovskaya Oblast', Russian Federation. Tel.: +7 (3435) 490518. E-mail: aleksey.zorin@evraz.com

**Roman A. Il'inykh**, Leading Production Engineer, JSC "EVRAZ NTKM". 1, Metallurgov str., 622025, Nizhniy Tagil, Sverdlovskaya Oblast', Russian Federation. Tel.: +7 (3435) 490631. E-mail: Roman.Ilinykh@evraz.com

**Vitaliy V. Brekson**, Head of Department for Design Engineering and Analysis, Ural Locomotives Ltd. 36, Parkovaya str., Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovskaya Oblast', Russian Federation. Tel.: +7 (343) 379 4132. E-mail: brekson@ulkm.ru

**Abstract.** The paper presents development/comprehension tests outcomes of locomotive wheel tyre prototypes of grade 'H' medium alloy steel. These high-strength and high crack resistance tyres are intended for use with series 2EC10, 2EC7 and 2EC6 new generation freight electric locomotives with asynchronous traction drive.

The work under discussion was carried out by the JSC VNIIZhT experts in cooperation with JSC "EVRAZ NTKM". It covered the development of wheel tyre production specifications including those related to chemical content and mechanical properties of steel, appraisal of the tyre heat treatment conditions, manufacturing of tyre prototypes as well as laboratory and rig testing aimed to assess the tyre property package.

Wheel tyre prototypes of grade "H" steel were subject to laboratory and rig tests at the JSC VNIIZhT experimental facilities inclusive of analysis of working layer mechanical properties and of hardness/microstructure distribution over the cross-section, assessment of cold resistance, determination of the tyre static fracture toughness (crack resistance) K1C and damping capacity (tenacity) Kfc, as well as analysis of the tyre stress state.

Based on the positive results of the initial and acceptance tests of the grade 'H' steel tyres pilot run there was adopted the decision on the under-control operation of the tyres with the series 2EC10 electric locomotives on the Sverdlovskaya Railway network.

**Keywords:** locomotive wheel tyre; medium alloy steel; mechanical properties; hardness; fracture toughness; cold resistance; stress state

### References

1. Bryunchukov G.I., Razumov A.S., Sukhov A.V., Filippov G.A., Izotov V.I., Brekson V.V. *Razrabotka stali dlya lokomotivnykh bandazhey povyshennoy prochnosti i treshchinostoykosti* [Development of locomotive tire steel with increased strength and crack growth resistance]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2015, no. 4, pp. 12 – 18.

2. Bashnin Yu.A., Ushakov B.K., Sekey A.G. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki stali* [Technology of heat treatment of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 424 p.

3. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993. 448 p.

4. Guseev S.A., Bukhinik E.N., Cherevik Yu.I. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy obespecheniya dolgovrechnosti termicheskoy uprochnennykh bandazhey* [Current state and prospects for durability of thermally hardened bandages]. Chernaya metallurgiya. Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo: sb. nauch. tr. [Ferrous metallurgy. Science. Technology. Production: Coll. sci. works]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, pp. 352 – 355.

5. Fedin V.M. *Ob'emno-poverkhnostnaya zakalka detaley podvizhnogo sostava i verkhnego stroeniya puti* [Space-surface hardening of parts of the rolling stock and track superstructure]. Moscow, Intext Publ., 2002. 208 p.

6. Shkol'nik L. M., Markov D.P. *Prokalivaemost' stali kak rezerv povysheniya iznosostoykosti bandazhey i koles* [Hardenability of steel as a provision to increase the wear resistance of tires and wheels]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1990, no. 8, pp. 32 – 36.

7. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

8. Fink K., Rorbakh R. *Izmerenie napryazheniy i deformatsiy* (transl. from German) [Measurement of stress and strain]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1961. 536 p.

9. Kiselev S.N. et al. *Strukturnoe i napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie bandazhey koles lokomotivov pri zakalke* [Structural and stress-strain state of wheel tires of locomotives during quenching]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1991, no. 1, pp. 42 – 46.

10. Bryunchukov G.I., Markov D.P. *Eksperimental'naya otsenka raspredeleniya ostatochnykh napryazheniy v lokomotivnykh bandazhakh* [Experimental evaluation of the residual stress distribution in locomotive bandages]. Voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh rynochnoy ekonomiki. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT" [Issues of railway transport development in a market economy. Coll. of sci. works of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2007, pp. 180 – 188.