



ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСАХ

А.В. КОШУЛЯН, В.П. МАЛАЙЧУК, А.В. МОЗГОВОЙ, А.П. ТИМОЩЕНКО, Л.В. ЧУПРИНА

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.
49050, г. Днепропетровск, просп. Гагарина, 72. E-mail: rea.ftf@dnpu.dp.ua

Представлены результаты исследований остаточных напряжений новых цельнокатанных железнодорожных колес на основании экспериментальных измерений ультразвуковым контактным методом с помощью прибора Debbie. Проведен анализ случайных погрешностей, связанных с неконтролируемыми условиями выполнения измерений. Установлено, что среднеквадратическое отклонение случайной погрешности составляет около 3,5 МПа при измерении чистовых колес. Показано, что для исследованных колес характерна флуктуация остаточных напряжений по окружности обода, которая не может быть объяснена случайной ошибкой измерений. Это обуславливает уникальность колес: у каждого колеса своя оценка параметров статистических закономерностей. В качестве показателей, содержащих информацию об остаточных напряжениях колес, предложено использовать среднее значение измерений по всем точкам, равномерно расположенных по окружности обода, и значение среднеквадратического отклонения измерений по этим точкам. Замечено, что разброс средних значений измерений в группе однотипных колес значительно превышает разброс, вызванный флуктуациями отдельных колес: 18,9 и 7,1 МПа по величине среднеквадратического отклонения. Представлены результаты корреляционного анализа измерений остаточных напряжений, выполненных ультразвуковым методом и разрушающим методом, путем измерения сходимости обода после его радиальной разрезки, а также методом голографической интерферометрии. Результаты настоящего исследования могут быть использованы для создания методики неразрушающего контроля остаточных напряжений железнодорожных колес ультразвуковым методом. Библиогр. 15 назв., рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, остаточные напряжения, ультразвуковой метод

Эксплуатационная надежность железнодорожных колес зависит от многих факторов, из которых одним из наиболее существенных является величина сжимающих остаточных напряжений (ОН), препятствующая возникновению и развитию трещин, выходящих на поверхность обода.

В настоящее время ОН в соответствии с ГОСТ 10791 контролируются разрушающим способом посредством огневой радиальной разрезки и измерением величины схождения после остывания колеса. Разрезка проводится в произвольно выбранном месте и по результатам, полученным на одном колесе, принимается решение по всей партии колес [1].

Стандартом ГОСТ Р 54093 для измерения ОН предлагаются тензометрический (разрушающий), рентгеновский и ультразвуковой (УЗ) (неразрушающие) методы контроля [2]. Ведущими зарубежными фирмами-производителями колес и их потребителями проведены соответствующие исследования и применительно к неразрушающему УЗ контролю определены критериальные показатели уровня ОН. Стандартом EN 13262 указаны требования для допустимых ОН в новых цельнокатанных колесах — они, во-первых, должны быть сжимающими в области, прилегающей к поверхности катания, во-вторых, находиться в диапазоне –80... –150 МПа и, в-третьих, уменьшаясь по мо-

дулю, переходить через нуль на глубине между 35 и 50 мм. В качестве методов контроля ОН предлагаются тензометрический (разрушающий) и УЗ (неразрушающий) методы [3].

Впервые УЗ метод измерения напряжений в колесах был опробован в 1973 г. [4]. Примерно до 1990 г. большое количество отдельных исследователей и многочисленные группы по всему миру совершенствовали измерительную технику и разработали различные подходы измерения напряжений в образцах и готовых изделиях [5].

Положительные результаты, подтвердившие возможность измерений ОН УЗ методом, получены как зарубежными, так и отечественными исследователями. Совместный проект федерального управления железных дорог (США) с польской академией наук и рядом других организаций по оценке ОН в колесах показал хорошую достоверность результатов измерений ОН при помощи контактных и бесконтактных УЗ методов наряду с разрушающими испытаниями и значениями напряжений, полученных моделированием методом конечных элементов [6]. Различные способы измерения ОН опробованы также российскими исследователями и приведены в работе [7] — для контактного УЗ метода, в [8] — для бесконтактного, [9] — для рентгеновского и [10] — для тензометрического. Эти исследования основывались на не-

В работе принимали участие Н. А. Богун, А. М. Нестеренко, А. Н. Петренко, Ю. В. Сохач, Д. К. Тесленко, А. Г. Фесенко

© А. В. Кошулян, В. П. Малайчук, А. В. Мозговой, А. П. Тимощенко, Л. В. Чуприна, 2013

большом массиве измерений, что не позволяет сделать выводы и рекомендации о технологии приемочного (сдаточного) неразрушающего контроля ОН на заводе-изготовителе.

Отечественными исследователями первые результаты анализа ОН в цельнокатаных колесах, по измерениям УЗ методом, приведены в работах [11,12]. Как продолжение этих исследований в данной работе основные результаты получены путем статистической обработки измерений ОН УЗ контактным методом более 200 колес и сравнения результатов с разрушающими испытаниями.

Физические основы измерений. УЗ метод измерения ОН основывается на акустоупругом эффекте: линейной зависимости скорости упругих волн от механических напряжений.

Анизотропия скорости УЗ в объеме металла связана с ОН [13]. При этом на анизотропию скорости УЗ, кроме ОН, оказывает влияние структура материала — текстура, которая включает предпочтительную ориентацию зерна и расположение неметаллических включений [14].

Для железнодорожных колес принимается, что сжимающие напряжения действуют вдоль окружности обода, радиальные ОН малы, а влияние текстуры на анизотропию скорости УЗ происходит в радиальном направлении [3]. ОН в этом случае рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{V_h - V_r}{(V_h + V_r)/2} = \frac{t_r - t_h}{(t_r - t_h)/2} = B_0 + C_A \sigma_h, \quad (1)$$

где V_h, V_r, t_h, t_r — скорость и время прохождения поперечных УЗ волн, поляризованных в окружном (h) и радиальном (r) направлениях.

Преимуществом данного метода измерений является то, что результат не зависит от толщины обода и его температуры [14]. Если известны константы B_0 и C_A , то по измерению разности времени прохождения УЗ волн можно рассчитать величину ОН. Калибровочные константы можно определить путем проведения соответствующих экспериментальных исследований.

В данной работе измерения проводили прибором Debbie, который может применяться для неавтоматизированной оценки напряженного состояния как новых колес, так и колес, бывших в эксплуатации [5]. Калибровочные константы, использованные при этом, были экспериментально определены на образцах из отечественных колес в лаборатории проф. Юлина Депутата.

Схема измерений ОН. Измерения ОН осуществлялись в m точках, равномерно расположенных по ободу каждого колеса и по n измерений в каждой точке (рис. 1, а). Расположения преобразователя при измерениях в каждой точке условно показано на рис. 1, б.

Массив измерений каждого j -го колеса представляет собой матрицу $X_j, \dim X = m \times n$, каждый элемент которой обозначен через $x_j(i,k), i \in [1,m], k \in [1,n]$.

Обработка результатов измерений ОН. Предварительное изучение измерений ОН показали, что их следует рассматривать как случайные величины со своими вероятностными закономерностями. Если в i -й точке обода колеса выполнить серию измерений, то результат в этой точке можно охарактеризовать средним значением и среднеквадратическим отклонением $\sigma^*(i)$. Результаты измерений ОН в одной и той же точке для случая, когда серия из 30-ти измерений получена без изменения положения датчика, МПа: $x = -106, \sigma^* = 1,0$ и для случая, когда после каждого выполненного измерения датчик повторно переустанавливался на ту же позицию, МПа: $x = -113, \sigma^* = 2,5$.

Как видно, при измерениях с переустановкой датчика дисперсия случайной ошибки увеличивается в шесть раз, однако, кроме этого, также изменяется и среднее значение измерений на контролируемом участке. Чтобы уменьшить влияние положения датчика, контактной жидкости и других неконтролируемых случайных условий на результат измерений, в каждой точке колеса после серии из n -измерений датчик переустанавливали.

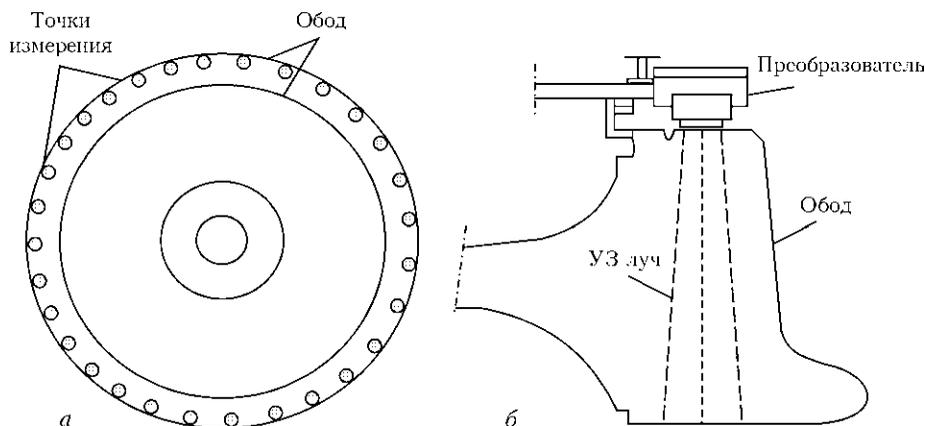


Рис. 1. Расположение точек измерения по ободу колеса (а) и положение преобразователя на позиции измерений (б)



Экспериментально исследовалось влияние шероховатости поверхности обода (рис. 2, *а*) и угла расположения датчика (рис. 2, *б*) на показания прибора в одной и той же точке измерений. Установлено, что при уменьшении шероховатости с 5,5 *Ra* до 1 *Ra* среднеквадратическое значение случайной ошибки изменяется от 13 до 5 МПа, причем с минимумом около 3 МПа в районе 2 *Ra*. Шероховатость изменяли путем шлифовки поверхности обода черного колеса с последующим ее замером прибором TR100. При изменении угла поворота в пределах $\pm 10^\circ$ среднее значение в точке меняется на 20...30 %.

По матрице измерений каждого колеса вычислялись среднее значение измерений в *i*-й точке $\bar{x}_j(i)$, отклонение *k*-го измерения от этого среднего $\Delta x_{0j}(i,k) = x_j(i,k) - \bar{x}_j(i)$ и его средний квадрат $\Delta \bar{x}_{0j}^2(i)$. Величина $\bar{x}_j(i)$ является оценкой остаточного напряжения в *i*-й точке, а показатель $\sigma^* = \sqrt{\Delta \bar{x}_{0j}^2(i)}$ — среднеквадратическим значением случайной ошибки измерений в этой точке. На рис. 3 для некоторых колес показаны графики средних значений, рассчитанных по пяти замерам ОН в каждой точке по окружности обода. График на рис. 3, *а* построен по 25-ти точкам, равномерно

расположенных по окружности, а на рис. 3, *б* — по 95-ти точкам.

Отметим, что характер подобных кривых может быть разным для различных колес: от медленно меняющихся симметричных или асимметричных, напоминающих окружность или эллипс, как на рис. 3, *а*, до шумоподобных, флуктуирующих вокруг среднего значения измерений \bar{X} , как на рис. 3, *б*.

Матрица значений разбросов Δx_{0j} содержит информацию о характере случайных ошибок измерений *j*-го колеса. Вектор величин $\Delta H_j(i) = \bar{x}_j(i) - \bar{X}_j$ — это разброс средних значений в точках относительно среднего значения всех измерений \bar{X} . Его средний квадрат $\Delta \bar{H}_j^2$ — это дисперсия значений $\bar{x}_j(i)$. Величины \bar{X} и $\sqrt{\Delta \bar{H}_j^2}$ могут быть выбраны в качестве интегральных показателей ОН колеса, измеренного УЗ методом. В свою очередь разброс $\Delta x_{pj}(i,k) = x_j(i,k) - \bar{X}_j$ характеризует как флуктуацию измерений ОН по окружности обода, так и случайную ошибку и для него установлена зависимость:

$$\overline{\Delta x_{pj}^2} = \Delta \bar{H}_j^2 + \Delta \bar{x}_{0j}^2 \quad (2)$$

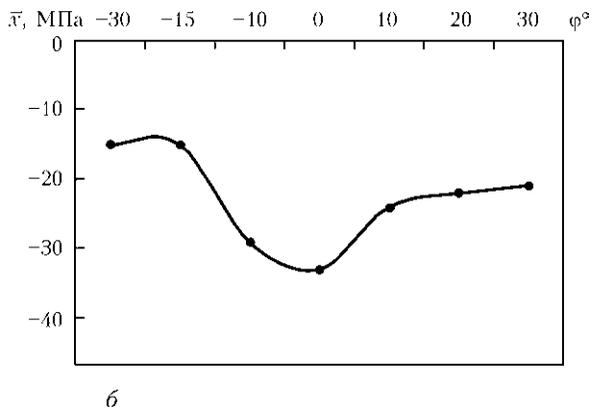
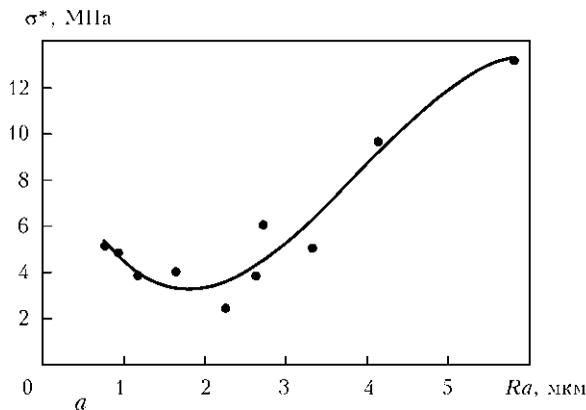


Рис. 2. Влияние шероховатости поверхности (*а*) и угла поворота датчика (*б*) на величину ОН

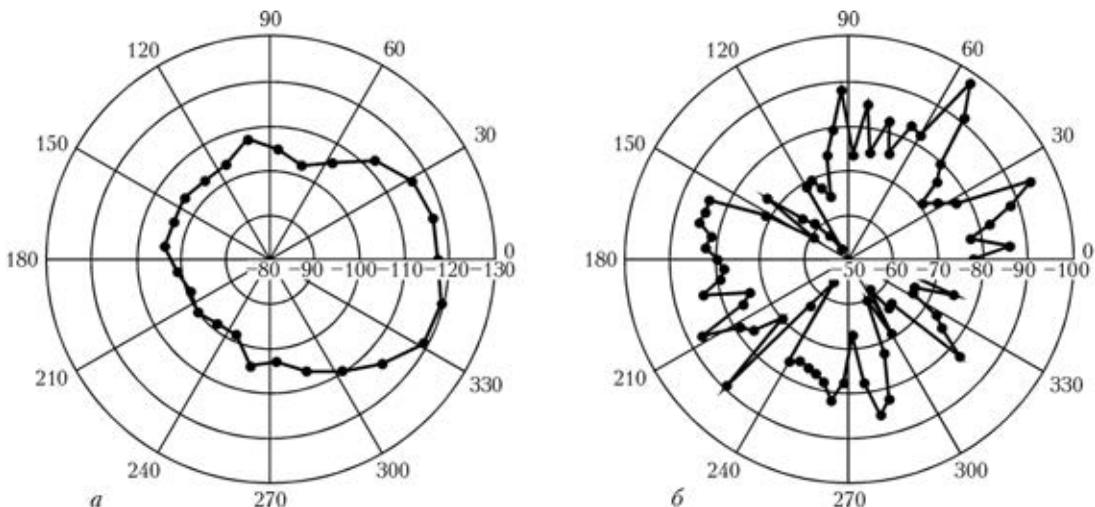


Рис. 3. Графики средних значений измерений ОН по окружности обода колес: *а* — 42307-99 ($m = 25, n = 5$); *б* — 21376-061 ($m = 95, n = 5$)



На рис. 4 для группы 100 колес из стали R7, измеренных минимум в 25-ти точках по ободу и по пяти измерений в каждой точке, представлены гистограммы ошибок измерений $\Delta x_{0j}(i,k)$, флуктуаций $\Delta H_j(i)$ и разброса $\Delta x_{pj}(i,k)$. Их выборочные значения $\sigma^*[\Delta x_{0j}] = 3,5$ МПа, $\sigma^*[\Delta H_j] = 7,1$ МПа, $\sigma^*[\Delta x_{pj}] = 7,8$ МПа.

Следует отметить, что наличие флуктуаций (рис. 3) не зависит от случайных ошибок измерений. В связи с этим, по мнению авторов, требуется доработка стандарта EN 13262, что необходимо для учета неравномерности по окружности обода ОН, и использование этого показателя наряду со средним значением ОН как еще одного критерия качества.

Средние значения \bar{X}_j множества колес также являются случайными величинами. На рис. 5 представлена гистограмма измерений $x_j(i,k)$ той же группы из 100 колес и гистограмма средних значений этих измерений \bar{X}_j . Как видно, среднее значение всех измерений группы и их средних одинаково и составляет $\bar{X}_j = 75$ МПа.

Как показано на рис. 5, все исследованные колеса удовлетворяют требованию части D3 положения 1 стандарта EN 13262 — все измеренные ОН сжимающие (отрицательные), однако только для 40 % колес среднее значение ОН \bar{X}_j находится в диапазоне $[-150...-80]$ МПа (на гистограммах показано штриховой линией), что не соответствует положению 3.5.2. этого нормативного документа.

Среднеквадратический разброс средних \bar{X}_j равен 18,9 МПа, что значительно больше, чем разброс измерений в колесе, который составляет 7,8 МПа. Таким образом, колеса можно отнести к объектам контроля с двумя случайными параметрами \bar{X}_j и Δx_{jp}^2 .

Сравнительный анализ напряжений по результатам их разрушающего и неразрушающего контроля. ОН тридцати колес различных ти-

пов оценивали с помощью прибора Debbie, а также в соответствии с ГОСТ 10791 методом измерения сходимости обода после его радиальной

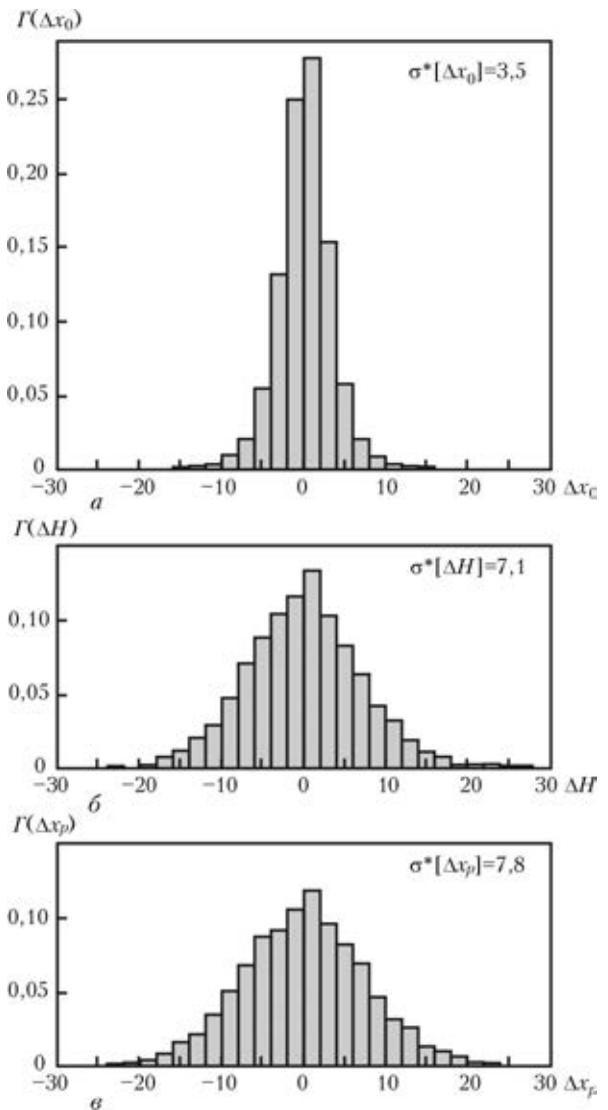


Рис. 4. Гистограммы разброса: а — случайных ошибок; б — значений ОН в точках; в — измерений относительно средних значений ОН

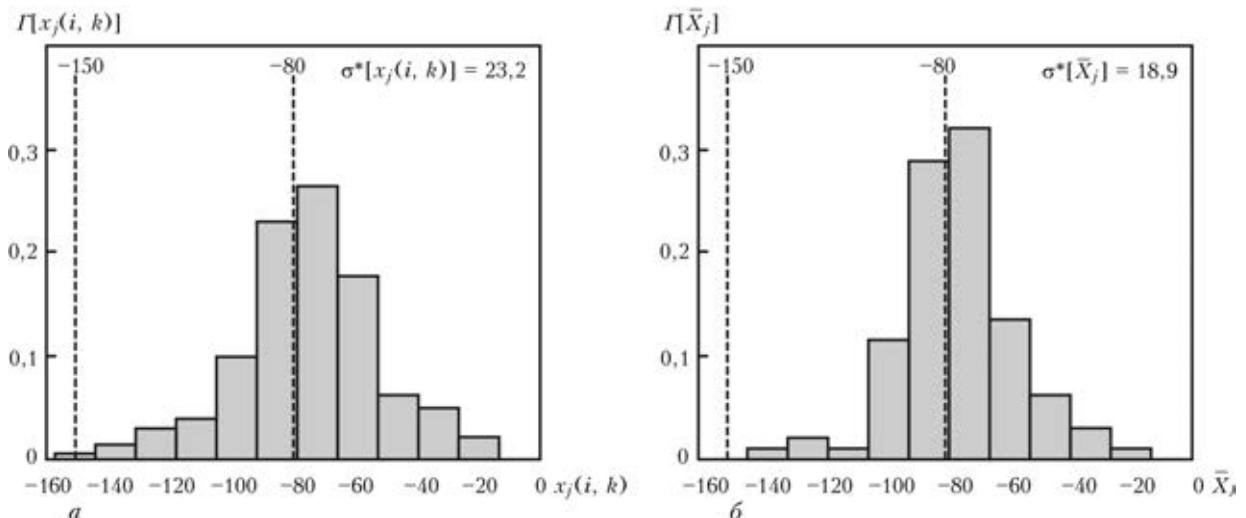


Рис. 5. Гистограммы измерений (а) и средних значений измерений (б) группы из 100 колес стали R7



ОН колеса № 32547-154, измеренные при помощи прибора Debbie и методом голографической интерферометрии

| Способ измерения | Номер точки | | | | | | | | Среднее значение | Среднеквадратическое отклонение |
|------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|---------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| Debbie | -90 | -115 | -102 | -118 | -117 | -105 | -117 | -115 | -110,0 | 9,9 |
| Голография | -73 | -88 | -110 | -122 | -78 | -103 | -87 | -93 | -94,3 | 16,5 |

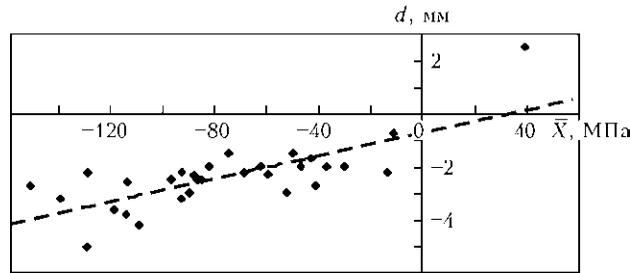


Рис. 6. Регрессионная зависимость величины расхожимости обода после радиальной разрезки в соответствии с ГОСТ 10791 от ОН, измеряемого прибором Debbie

разрезки. На рис. 6 по экспериментальным данным построен график зависимости расхожимости обода после резки d от среднего значения напряжения \bar{X} , измеряемого прибором Debbie.

Коэффициент корреляции между измерениями сходимости и напряжений составляет 0,73, что указывает на возможность использования прибора Debbie для НК каждого колеса.

Для колеса 32547-154 ОН измеряли при помощи прибора Debbie, а также методом голографической интерферометрии. Для создания и последующей регистрации перемещений поверхности сверлились отверстия диаметром 5 мм на такую же глубину. Результаты измерений приведены в таблице.

Как видно из таблицы, для ОН, измеренных методом голографической интерферометрии, также характерны флуктуации по окружности обода, в данном случае ОН изменяются от -122 до -73 МПа. Отличия между измерениями вызваны, по всей видимости, тем, что значения ОН определяли расчетным способом с использованием табличных, а не фактических значений модулей упругости.

Выводы

Проведен статистический анализ измерений прибором Debbie ОН более 200 цельнокатаных колес (всего около 20 тыс. измерений) различных типов и марок стали. Установлено, что среднеквадратическое значение случайной ошибки измерений составляет 3,5 МПа для чистовых колес и 7,2 МПа для черновых.

Было обнаружено, что для ОН колеса характерны флуктуации по окружности обода, не связанные со случайными ошибками. Это обуславливает уникальность колес: у каждого колеса своя оценка параметров статистических закономерностей. В качестве показателей, содержащих инфор-

мацию об ОН колес, предложено использовать среднее значение всех измерений и среднеквадратическое отклонение средних значений измерений в точках.

По результатам статистического анализа установлено, что среднеквадратический разброс средних значений измерений ОН в группе однотипных колес значительно больше, чем разброс измерений в единственном колесе. Таким образом, колеса отличаются друг от друга в большей мере средней величиной измеряемых ОН и в меньшей мере величиной разброса, обусловленного флуктуациями ОН по окружности обода.

Установлено, что ОН всех серийно изготавливаемых колес сжимающие. При этом только для 40 % из них средние значения измерений по ободу находятся в интервале -150...-80 МПа, указанном стандартом EN 13262.

Исследована корреляционная связь между величинами ОН, измеренных прибором Debbie (МПа), и сходимостью обода после разрезки (мм). Выборочное значение коэффициента корреляции равно 0,73. При этом сходимость обода изменялась от -2,5 до 5,0 мм, а ОН этих колес соответственно от -38,6 до -150 МПа.

1. ГОСТ 10791-2012. Колеса цельнокатаные технические условия; [межгосударственный стандарт]. — М.: Стандартинформ, 2006. — 28 с.
2. ГОСТ Р 54093-2010. Колеса железнодорожного подвижного состава // Методы определения остаточных напряжений. — М.: Стандартинформ, 2011. — 16 с.
3. DIN EN 13262. Railway applications — Wheelsets and bogies // Wheels — Product requirements/ [English version of DIN EN 13262:2006] — CEN, 2006.
4. Experiences in applications of ultrasonic measurements for railroad industry — DEBRO UMS / A. Bartosiewicz, A. Brokowski, J Deputat, K. Mizerski. — Nowosolipsowska 1, 02-385, Warsaw.
5. Hawk. V. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods — Institute of Material Sciences and Engineering; Amsterdam: Elsevier Science, 1997; ISBN-13: 978-0444824769.
6. Stone D., Garcia G., Burnett S. An Evaluation of residual stress in cast steel railroad wheels using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) // Railroad wheel residual stress detection program, final report/ [U.S. Department of Transport, Federal Railroad Administration] — The National Technical Information Service, Virginia. — 1998.
7. Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Измерение остаточных напряжений в ободах железнодорожных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. — 2010. — 3. — С. 50-54.
8. Оценка остаточных напряжений в ободах вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак и др. // Там же. — 2011. — № 8. — С. 16-28.
9. Шиткин С. Л. Исследование рентгеновским методом влияния остаточных напряжений в цельнокатаных ва-



- гонных колесах на повышение их качества: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2007. — 23 с.
10. Узлов И. Г., Бабаченко А. И. Исследование напряженного состояния железнодорожных колес повышенной прочности // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. — 2005. — № 11. — С. 166–169.
 11. *Неразрушающий контроль остаточных напряжений железнодорожных колес* / А. В. Кошулян, В. П. Малайчук, А. В. Мозговой и др. // Матер. XVI Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2008. — С. 232–237.
 12. *Оценка влияния параметров термической обработки на величину и распределение остаточных напряжений в железнодорожных колесах* / А. В. Кошулян, А. В. Мозговой, А. П. Тимошенко, Л. В. Чуприна // Матер. XVI Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2008. — С. 222–228.
 13. *Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д.* Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1989. — 240 с.
 14. *Hirao M., Ogi H.* EMATs for Science and Industry // Osaka University, Japan Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN-13: 978-1402074943.
 15. *Jemec V., Grum J., Bozicko S.* Ultrasonic measurement of hoop stress in the Rim of monoblock railroad wheel // *Ceska společnost pro nedestruktivni zkouseni — Defektoskopie 2008* [materialu 38 mezinarodni konference]. — Brno, 2008.

The paper presents the results of investigations of residual stresses in new whole-rolled railway wheels based on experimental measurements by an ultrasonic contact method with Debbie system. Analysis of random errors associated with uncontrolled conditions of taking the measurements is performed. It is established that the mean-root-square deviation of the random error is equal to about 3.5 MPa at measurement of finished wheels. It is found that the studied wheels are characterized by fluctuation of residual stresses around the rim circumference that cannot be attributed to random error of measurement. This is due to uniqueness of the wheels: each wheel has its own evaluation of statistical regularity parameters. It is proposed to use the mean value of measurements on all the points equidistant around the rim circumference and value of mean-root-square deviation of measurements by these points as indices containing information on residual stresses of the wheels. It is noted that scatter of mean measurement values in a group of similar wheels is much higher than the scatter caused by fluctuations of individual wheels: 18.9 and 7.1 MPa by value of mean-root-square deviation. The paper presents the results of correlation analysis of residual stress measurements, made by ultrasonic technique and destructive technique by measurement of rim convergence after its radial cutting up, as well as by the method of holographic interferometry. Results of this study can be used to develop a procedure of non-destructive testing of residual stresses of railway wheels by ultrasonic testing.

Keywords: Railway steel, residual stresses, ultrasonic method

Поступила в редакцию
03.08.2012



Конференция «Неразрушающий контроль 2013»

14 – 16 мая 2013 г.

Киев

Ассоциация ОКО проводит конференцию «Неразрушающий контроль 2013». Конференция будет проходить в живописнейшем районе города Киева Пуца-Водица при поддержке и участии «Ультракон-Сервис», «Промприлад», УкрНИИНК.

В рамках конференции будет проходить специализированная выставка, посвященная 20-летию «Ультракон-Сервис».

В программе конференции планируется заседание секций:

- ◆ Атомная энергетика
- ◆ Авиация
- ◆ Железнодорожный транспорт
- ◆ Машиностроение и металлургия
- ◆ Сертификация персонала в области неразрушающего контроля

На секционных заседаниях будут рассмотрены вопросы разработки и применения новейших средств неразрушающего контроля, методов неразрушающего контроля, а также новых технологий и методик.

Тел.: (044) 531-37-27, 531-37-26

E-mail: ndt@ln.ua