

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

А. А. СМОЛИНА, А. А. ПОГОРЕЛОВ

*Сформулирована задача количественной оценки остаточных напряжений (ОН) в рамках плоской модели. Предложена методика количественной оценки, основанная на измерении коэрцитивной силы материала напряженной конструкции. Проведена экспериментальная проверка методики на примере контроля ОН в железнодорожных колесах.*

*The problem of quantitative assessment of residual stresses (RS) in terms of a plane model is defined. A procedure of quantitative assessment is proposed based on measurement of coercive force of stressed structure material. Experimental verification of the procedure is performed for the case of control of RS in railway wheels.*

При рассмотрении методов неразрушающего контроля контроль остаточных напряжений (ОН) можно выделить в самостоятельную область. Изучением данной проблемы занимаются различные исследовательские группы [1–15]. Обзор основных способов определения таких напряжений приведен в работе [7]. Технологическими процессами, в которых желательна количественное определение ОН, являются термообработка металлоконструкций [16], вибростабилизирующая обработка [17] и контроль напряжений при естественном старении изделий. Также возможна сортировка по величине ОН готовой продукции и полуфабрикатов в процессе изготовления изделия.

Одним из распространенных способов определения ОН в ферромагнитных материалах является магнитный метод контроля, в частности, метод магнитной структуроскопии и магнитошумовой. Как правило, эти методы носят качественный характер и позволяют выявить аномальные участки напряженного состояния на поверхности конструкции. Данные методы наименее трудозатратны и не требуют особых условий реализации.

В настоящей статье предлагается методика количественной оценки ОН при измерении коэрцитивной силы контролируемого участка изделия. Возможность данной оценки возникает при совместном применении магнитного и тензометрических методов. Некоторые этапы разработки данной методики описаны в работах [13–15].

Согласно методике определяются два параметра  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  — соответственно максимальные растягивающее и сжимающее напряжения в контролируемой области.

**Физический смысл параметров  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ .** В недеформированном теле расположение молекул соответствует состоянию его теплового равновесия. При деформации расположение молекул меняется и тело выводится из первоначального состояния [18]. В трехмерном пространстве воз-

никновение сил, стремящихся вернуть тело в состояние равновесия, обычно представляют в виде тензора. Считается, что тензор симметричен:

$$\sigma_{ik} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}, \sigma_{ik} = \sigma_{ki}.$$

Симметричный тензор в точке может быть приведен к диагональному виду [19]. На практике часто рассматривается плоская задача нахождения ОН [20]. Таким образом, тензор напряжения может принять вид:

$$\sigma_{пл} = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} \end{bmatrix}.$$

С точки зрения физики  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  представляют главные компоненты тензора напряжения при рассмотрении плоской задачи.

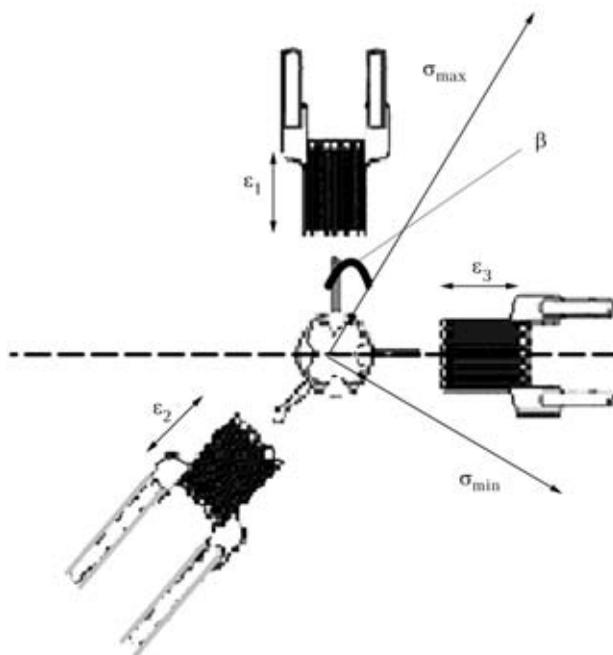


Рис. 1. Модель распределения напряжений на плоскости



На рис. 1 представлено схематическое изображение параметров  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  [20].

**Описание методики определения ОН.** ОН при частичной деструкции вызывают деформацию в материале. Согласно стандарту [20], при тензометрическом методе отверстия связь между деформациями и напряжением (см. рис. 1) имеет вид:

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_r$  — деформация в  $r$ -м направлении;  $\beta$  — угол, отклонение направления распространения  $\sigma_{\max}$  от чувствительного элемента, измеряющего деформацию  $\epsilon_1$ ;  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  — калибровочные константы.

Как отмечено в работе [18], значение коэрцитивной силы, измеряемое с помощью П-образного намагничивающего устройства, имеет корреляцию с деформацией, направленной перпендикулярно оси намагничивания в измеряемой области.

В соответствии с приведенным выше предположением, связь коэрцитивной силы и напряжений будет иметь вид:

$$H_{cr} = (C + D \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (C - D \cos 2\beta) \sigma_{\min}, \quad (2)$$

где  $H_{cr}$  — значение коэрцитивной силы;  $C$ ,  $D$  — калибровочные константы.

Измерение коэрцитивной силы проводится в трех направлениях, по аналогии с тензометрическим методом отверстий.

Тогда значения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  вычисляются по формуле:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C-D & C+D \\ C+D & C-D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_+ \\ S_- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{t}{q}\right), \quad (4)$$

где  $S_+ = p + \sqrt{q^2 + t^2}$ ,  $S_- = p - \sqrt{q^2 + t^2}$ ,

$$p = \frac{Hc_3 + Hc_1}{2}, \quad q = \frac{Hc_3 - Hc_1}{2}, \quad t = \frac{Hc_3 + Hc_1 - 2Hc_2}{2},$$

$Hc_1$ ,  $Hc_2$ ,  $Hc_3$  — результаты измерения коэрцитивной силы.

Значение калибровочных постоянных  $C$  и  $D$  может быть определено в соответствии с выражением:

$$\begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} + \sigma_{\min} & \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \\ \sigma_{\max} + \sigma_{\min} & \sigma_{\min} - \sigma_{\max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_+ \\ S_- \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где значения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  находятся любым деструктивным методом в той же области, в которой осуществляется магнитный контроль (при эксперименте для нахождения применялся тензометрический метод отверстия [20]).

**Проведение эксперимента.** Эксперимент проводили на железнодорожном колесе. Поверхность колеса разделили на 14 секторов. Первоначально проводили измерение коэрцитивной силы в трех направлениях для каждого сектора. Для измерения использовали магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М. Время проведения полного измерения на одном секторе не превышало двух минут. Полученные значения коэрцитивной силы представлены в табл. 1.

Для определения значений  $C$  и  $D$  в секторе №1 были вычислены величины  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  с помощью тензометрического метода отверстий [19].

В табл. 2 представлены результаты количественной оценки напряжений в колесе, определенные в соответствии с формулами (3) и (4).

Значения калибровочных констант  $C$  и  $D$ , вычисленных по формуле (5), равны:  $C = 4,0176 \cdot 10^{-7}$ ;  $D = -4,2294 \cdot 10^{-10}$ .

Для проверки результатов количественной оценки напряжений, полученных на основании магнитных измерений, в секторах № 3 и 10 были получены оценки напряжений тензометрическим методом отверстий [19].

**Таблица 1.** Результаты измерения коэрцитивной силы

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$H_{c1}$ , А/см	8,4	8,25	8,4	8,55	8,4	8,65	8,45	8,35	8,1	8,35	8,3	8,5	8,4	-
$H_{c2}$ , А/см	8,25	8,25	8,15	8,3	8,3	8,4	8,35	8,25	8,25	8,2	8,3	8,2	8,25	-
$H_{c3}$ , А/см	8,0	8,0	7,9	8,1	8,05	8,05	8,35	8,25	8,25	8,2	-	8,2	8,25	-

*Примечание.* В секторе 14 по техническим причинам измерения не проводили

**Таблица 2.** Результаты количественной оценки напряжения

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sigma_{\max}$ , МПа	254	219	306	278	235	370	315	197	254	161	-	312	291
$\sigma_{\min}$ , МПа	-234	-199	-285	-257	-214	-349	-294	-177	-234	-140	-	-291	-27
$\beta^\circ$	7	23	0	-3	12	5	15	9	38	-6	-	-6	9

*Примечание.* В секторах 11 и 14 по техническим причинам измерения не проводили

Таблица 3. Сравнение результатов количественных оценок

Параметр	Сектор 1	Сектор 3	Сектор 10
$\sigma_{\max}$ , МПа	254/254	295/306	118/161
$\sigma_{\min}$ , МПа	-234/-234	-285/-285	-133/-140
$\beta^\circ$	0/7	0/0	-1/-6

Примечание. Перед чертой — результаты измерения тензорным методом, за чертой — методом магнитной структуроскопии.

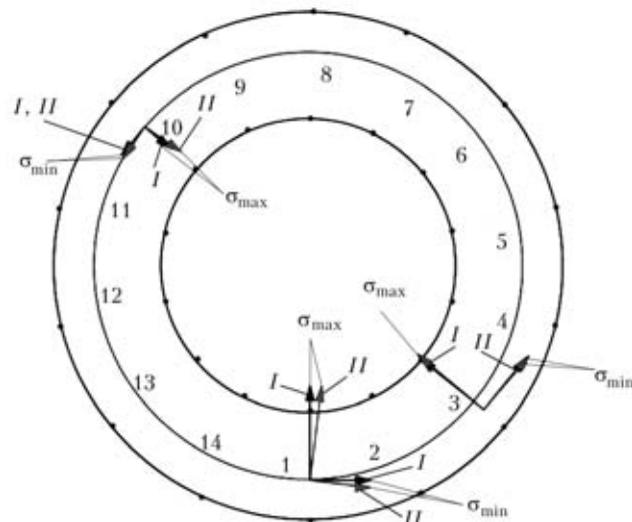


Рис. 2. Распределение напряжений на железнодорожном колесе: I – векторное изображение напряжений, определенных тензометрическим методом отверстий; II – векторное изображение напряжений, определенных методом магнитной структуроскопии

Результаты значений напряжений, полученных двумя методами в трех секторах, представлены в табл. 3.

На рис. 2 схематически изображены в векторном виде значения напряжений, полученных тензометрическим методом отверстий и методом магнитной структуроскопии.

Тензометрический метод отверстий требует значительно больших трудозатрат и времени, чем метод магнитной структуроскопии, поэтому сравнительные измерения тензометрическим методом отверстий проводили всего в трех секторах.

Как видно из сравнительных результатов количественных оценок (см. табл. 3), средняя погрешность оценки напряжения не превышает 10 %.

### Выводы

Предложена методика количественной оценки ОН, основанная на измерении коэрцитивной силы материала.

Предложена плоская модель ОН и сформулирована задача количественной оценки данных напряжений.

Для проверки методики был проведен эксперимент на железнодорожном колесе. Сравнение результатов оценки напряжений осуществляли путем контроля напряженного состояния тензо-

метрическим методом отверстий. Средняя погрешность определения оценок напряженного состояния составила около 10 %.

Выполненные исследования и проведенный эксперимент показали, что с помощью метода магнитной структуроскопии можно проводить количественную оценку напряжений в ферромагнитных конструкциях простой формы в производственных условиях.

1. Мужижкий М. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько Г. Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. — 2001. — № 1. — С. 38–46.
2. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (Ч. 1) // Там же. — 2001. — № 11. — С. 51–57.
3. Оценка текущего состояния и остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужижкий, Л. А. Крутикова и др. // Там же. — 2002. — № 4. — С. 3–9.
4. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы от одноосных напряжений (Ч. 2) // Там же. — 2002. — № 4. — С. 10–17.
5. Бида Г. В. Магнитные характеристики тела — параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (Обзор) // Там же. — 2002. — № 6. — С. 19–33.
6. Костин В. Н., Кадров А. В., Кусков А. Е. Оценка упругих и пластических деформаций ферритоперлитовых сталей по магнитным свойствам вещества // Там же. — 2005. — № 10. — С. 13–22.
7. Венгринович В. Л., Дмитриевич Д. В. Байесовский подход к неразрушающему контролю напряженно-деформированного состояния // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 45–53.
8. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Там же. — 2004. — № 1. — С. 3–8.
9. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики коэрцитивной силы металла // Там же. — 2004. — № 1. — С. 20–22.
10. Magnetic behavior of plain carbon steels as a function of applied stress and strain conditions / E. S. Gorcunov, S. V. Smirnov, S. V. Zadvorkin // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине сентябрь 2006 (ECNDT).
11. Practice of Monitoring of the Stressed Condition, Fatigue of Welded Joints as Per Measurements of Magnetic Characteristic — Coercive Force / V. F. Matyuk, M. N. Delendikh, A. A. Osipov // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине, сентябрь 2006 (ECNDT).
12. Kruticova L., Kazuykevich I., Bezlyudkko G. Ya. Magnetic Diagnosis of Metallurgical Equipment Recourse Considering a roll as an Example // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине сентябрь 2006 (ECNDT).
13. Смолина А. А., Погорелов А. А. Задача контроля остаточных напряжений при совместном использовании магнитных методов и прямых методов тензометрии // Тез. 14-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий» (ЛЕОТЕСТ — 2009).
14. Смолина А. А., Погорелов А. А. Определение остаточных напряжений с помощью обобщения тензометрического метода отверстий и метода магнитной структуроскопии // Тез. 6-й Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и научно-техническая диагностика» июнь 2009 (УкрНДТ).



15. Смолина А. А., Погорелов А. А., Богун Н. А. Проблемные вопросы измерения остаточных напряжений методом магнитной коэрцитиметрии // Зб. наук. праць 13-ї Міжнар. наук.-техн. конф. Серія «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів» (ЛЕО-ТЕСТ — 2008).
16. Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1989. — 254 с.
17. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. — Краматорск: ДГМА, 2008. — 160 с.
18. Теоретическая физика. В 10-ти т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц // Теория упругости. Т. VII. — М.: Наука, 1987. — 248 с.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
20. ASTM E — 837-01<sup>E1</sup>. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method.

ОАО УкрНИИТМ,  
Днепропетровск

Поступила в редакцию  
12.08.2009



## WCNDT 2012 – 18-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ NDT

**Время проведения:** 18.04.2012 - 20.04.2012

**Место проведения:** Ю.А.Р., Дурбан

**Темы:** Неразрушающий контроль NDT

**Организатор и принимающая сторона**  
WCNDT 2012 – Институт НК ЮАР (SAINT)

### Отраслевая направленность конгресса WCNDT:

- Авиакосмическая, железнодорожная, автомобильная, судостроительная отрасли
- Нефтегазодобывающая, трубопроводная
- Архитектура и мостостроение
- Атомная промышленность, электроэнергетика
- Материалы (черные и цветные металлы, композиты, керамика, полимеры)
- Горное машиностроение
- Сертификация, тренинг
- Обработка данных, сенсоры
- Надежность систем контроля
- Стандартизация и др.

**Методы тестирования:** Радиографическое (RT), Ультразвуковое (UT), Акустико-эмиссионные (АТ), Инфракрасное термографическое (ТТ), Капиллярное (LT), Магнитно-порошковое (MT), Проникающее (PT), Индукционное (ET), Визуальное (VT) и другие

**WCNDT 2008** прошел в Шанхае в октябре. И хотя конференция и выставка изначально планировались к проведению в августе и были перенесены на октябрь из-за ужасного землетрясения, в ней приняли участие 764 делегата, причем 530 приехали из **50 стран мира**.

Нельзя как-то особо выделить какие-то отдельные сессии, посещаемость была везде хорошей, но, как обычно, наибольший интерес вызвали темы ультразвуковых фазированных решеток.

Что следует отметить, так это значительный интерес к выставке, как со стороны делегатов конференции, так и со стороны посетителей. **Всего 202 компании и организации экспонировали здесь свою продукцию и услуги** и только в первый день выставку посетили 3000 специалистов.

**Параллельно с конференцией прошли:** Генеральная ассамблея ICNDT, встречи комитета НК по ISOTC-135 и комитета политики и общих вопросов PGP-ICNDT. На ассамблее ICNDT был избран новый президент Майк Фарлей (MikeFarley) заменивший Дугласа Маршалла (DouglasMarshall). Также на этой встрече Германское общество NDT(DGZfP) было признано принимающей организацией **очередного форума 19 WCNDT 2016, который пройдет в Мюнхене**.

Но, прежде чем заглядывать так далеко в будущее, обращаем внимание, что 18-й WCNDT пройдет в ЮАР в апреле 2012 года. Презентацию **WCNDT 2012** провел президент Манфред Йоханнес (ManfredJohannes), также на церемонии закрытия форума в Шанхае была представлена 13-я азиатско-тихоокеанская конференция по неразрушающему контролю японского общества **APCNDT 2009** в Японии и 10-я европейская конференция по неразрушающему контролю **ECNDT 2010** в России.