

УДК 621.9.011: 621.9.019

В.Н. Трофимов, В.В. Карманов, А.А. Ширяев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

МЕТОД КАЛИБРОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При проектировании и изготовлении изделий ответственного назначения одним из регламентируемых параметров является уровень остаточных макронапряжений. Для контроля уровня RS_1 актуально использование методов неразрушающего контроля, например метода рентгеновской дифрактометрии и метода шумов Баркгаузена. При использовании указанных способов важной операцией является калибровка оборудования – настройка на нулевой уровень остаточных макронапряжений с применением эталонных образцов. Рассмотрены недостатки существующих эталонных образцов. Предложен способ калибровки с использованием плоских образцов, деформируемых по схеме изгиба.

Ключевые слова: остаточные макронапряжения, неразрушающий контроль, эталонные образцы, калибровка.

V.N. Trofimov, V.V. Karmanov, A.A. Shiriaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A METHOD OF CALIBRATING INSTRUMENTS FOR THE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES

In the design and manufacture of products for critical applications one of the regulated parameter is the level of residual macrostresses. To control the level of residual macrostresses actual use of nondestructive testing, such as X-ray diffraction method and the method of the Barkhausen noise. When using these methods, an important step is the calibration of equipment - setting the zero level RS_1 includes using reference samples. The shortcomings of the existing reference samples. A method for calibration using flat specimens deformed by bending scheme.

Keywords: residual macrostresses, nondestructive testing, reference samples, calibration.

В связи с появлением новых материалов и технологий их обработки в различных отраслях машиностроения, в частности в области аэрокосмической техники, атомного машиностроения, горнодобывающей промышленности, транспортных газо- и нефтепроводов, увеличивается количество критериев, по которым оцениваются прочность и надежность производимой продукции, что также способствует повышению ее конкурентоспособности.

В авиастроении при проектировании и изготовлении изделий ответственного назначения одним из регламентируемых параметров, которые указываются в конструкторско-технологической документации, является уровень остаточных напряжений 1-го рода (RS_1) [1, 2].

Для контроля уровня RS_1 актуально использование методов неразрушающего контроля (НК), например метода рентгеновской дифрактометрии (РД) [3, 4] и метода шумов Баркгаузена (ШБ) [5, 6].

Метод РД является универсальным и может использоваться для определения уровня RS_1 в поверхностных слоях изделий из любых поликристаллических металлов и сплавов. Определение RS_1 данным методом требует больших временных затрат и целесообразно при выборочном контроле деталей или проведении исследовательских работ (например, влияния технологии изготовления деталей на формирование уровня и знака RS_1).

Достоинством метода ШБ является возможность проведения оперативного контроля качества поверхностных слоев деталей из магнитных материалов в условиях серийного и массового производства, так как время измерения составляет доли секунды. Однако метод ШБ имеет существенный недостаток: он определяет некоторую величину магнитошумового параметра (МП), которая представляет комплексную характеристику структурно-энергетического состояния поверхностного слоя изделия, и учитывает, помимо остаточных напряжений, структуру металла, размер зерна и т.п., поэтому этим методом сложно определить знак RS_1 .

В Центре высокотехнологичных машиностроительных производств Пермского национального исследовательского политехнического университета при проведении исследований по влиянию режимов технологических процессов на формирование полей RS_1 в деталях используется роботизированный анализатор остаточных напряжений XSTRESS 3000, позволяющий работать как с датчиками рентгеновского излучения (метод РД), так и с магнитными датчиками (метод ШБ).

При использовании любого из указанных выше методов важнейшей операцией является операция калибровки используемого оборудования, в частности настройка рентгеновского дифрактометра на нулевой уровень RS_1 и определение МП, соответствующего этому уровню.

Для этой цели в состав анализатора остаточных напряжений XSTRESS 3000 входят эталонные образцы (далее – нуль-эталон), ко-

торые представляют собой таблетку из порошков чистого железа, никеля, титана или других металлов, частицы которых связаны полимером (рис. 1, 2). Технология изготовления нуля-эталоны такова, что, по утверждению изготовителей, в его объеме и на поверхности величина RS_1 равна нулю. При калибровке расчет RS_1 ведется с использованием модуля Юнга для чистых металлов.



Рис. 1. Общий вид нуля-эталонов железа и никеля

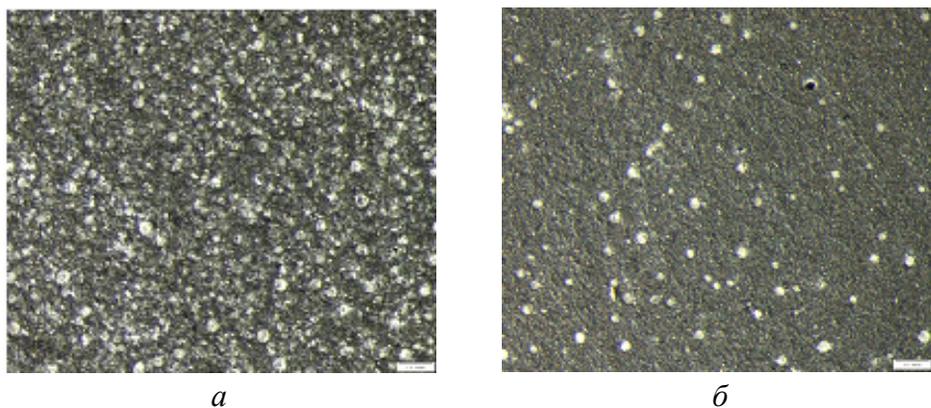


Рис. 2. Структура поверхности нуля-эталоны железа (а) и никеля (б) (увеличение $\times 50$)

Несмотря на то что нуля-эталоны аттестованы и запатентованы изготовителем, возникают вопросы по поводу обоснованности их применения:

1) структура поверхностного слоя нуля-эталоны существенно отличается от структуры компактного материала вследствие наличия разделяющих слоев полимера;

2) крупность фракций, использованных при изготовлении нуля-эталоны, заметно различается;

3) наличие включений (светлые пятна), вероятно, пузырьков воздуха, образующихся при полимеризации;

4) температурные условия хранения нуль-эталонов и периодическое рентгеновское излучение ведут со временем к деградации свойств полимерного связующего.

Не известно, как указанные факторы влияют на уровень RS_1 на поверхности нуль-эталонов, учитывая, что глубина проникновения рентгеновских лучей не превышает 40–50 мкм.

Кроме того, возникает еще один важный вопрос: насколько обосновано использование модуля Юнга для чистых металлов при определении RS_1 , если известно, что легирование, химико-термическая и механическая обработка влияют на его величину? Например, для циркониевых сплавов модуль Юнга может изменяться в пределах 10 % [7].

Возможно ли использование указанных нуль-эталонов из порошков чистых металлов в случае измерения RS_1 в деталях, изготовленных из сплавов с высоким содержанием легирующих элементов, например жаропрочных и жаростойких сплавов? Опыт авторов показывает, что при использовании данных нуль-эталонов при определении RS_1 диапазон отклонения значений RS_1 от их среднего значения может быть сопоставим с самим средним значением.

Кроме того, подобные нуль-эталоны не позволяют калибровать датчики при измерении RS_1 методом ШБ, так как наличие полимерной связки препятствует прохождению магнитного поля от излучателя к приемнику.

В связи с вышеуказанным актуальной является задача разработки нуль-эталонов и/или методик, позволяющих калибровать измерительные приборы при определении RS_1 в деталях из любых металлов и сплавов.

Ниже приведены теоретические предпосылки создания нуль-эталона с использованием компактного материала.

Рассмотрим изгиб пластины прямоугольного сечения шириной b и толщиной h из исследуемого материала, в которой существуют продольные остаточные напряжения.

Пусть остаточные напряжения распределены равномерно по ширине сечения. В ненагруженном состоянии эпюра распределения RS_1 может иметь вид, приведенный на рис. 3, *a*. На поверхности пластины имеются остаточные напряжения, равные $\sigma_{ост}$. Подобная эпюра получается при изгибе балки из идеального упруго-пластического материала [8].

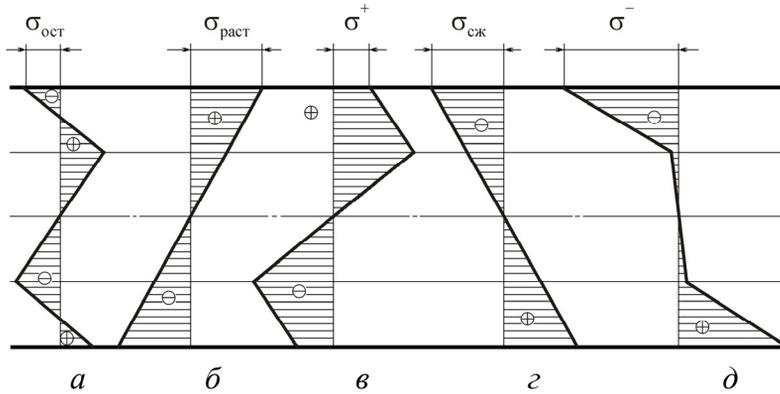


Рис. 3. Эпюры напряжений при нагружении пластины с остаточными напряжениями

Приложим к пластине изгибающий момент $M_{\text{раст}}$. Упругие растягивающие напряжения на поверхности пластины определяются по формуле

$$\sigma_{\text{раст}} = M_{\text{раст}} / W,$$

где W – момент сопротивления сечения пластины, $W = bh^2/6$. Эпюра распределения напряжений по сечению пластины приведена на рис. 3, б.

Напряжения в сечении нагруженной детали или конструкции определяются в соответствии с принципом суперпозиции как сумма напряжений, возникающих от действия внешних сил и остаточных напряжений. Складываем эпюры, приведенные на рис. 3, а и б, получим суммарную эпюру (рис. 3, в). Напряжения на поверхности пластины равны

$$\sigma^+ = \sigma_{\text{ост}} + \sigma_{\text{раст}}. \quad (1)$$

Приложим к пластине изгибающий момент $M_{\text{сж}}$, создающий на поверхности упругие сжимающие напряжения (рис. 3, г): $\sigma_{\text{сж}} = M_{\text{сж}}/W$.

Эпюра распределения напряжений имеет вид, показанный на рис. 3, д. Напряжения на поверхности пластины равны

$$\sigma^- = \sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{сж}}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) с учетом выражений для $\sigma_{\text{раст}}$ и $\sigma_{\text{сж}}$ получим

$$\sigma_{\text{ост}} = [(\sigma^+ + \sigma^-) - (M_{\text{раст}} - M_{\text{сж}})/W] / 2. \quad (3)$$

Приложим к пластине изгибающий момент M , такой, чтобы выполнялось условие

$$\sigma - \sigma_{\text{ост}} = M/W - \sigma_{\text{ост}} = 0. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получим

$$M = \sigma_{\text{ост}} W = [(\sigma^+ + \sigma^-) W - (M_{\text{раст}} - M_{\text{сж}})] / 2. \quad (5)$$

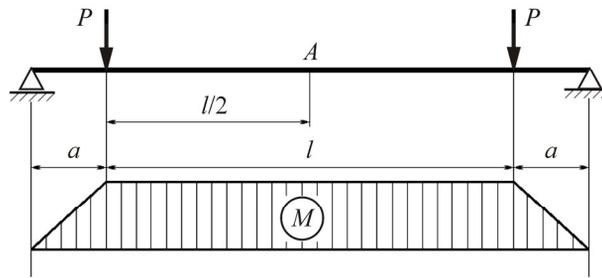
Для определения величины изгибающего момента M необходимо знать:

– величины σ^+ и σ^- (определяются в результате измерений методом РД);

– величины изгибающих моментов $M_{\text{раст}}$ и $M_{\text{сж}}$ (рассчитываются так, чтобы исключить появление в образце пластических деформаций, и задаются нагружающим устройством).

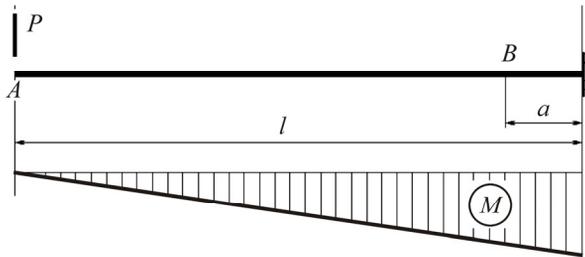
Таким образом, если к пластине приложить изгибающий момент, равный M , то напряжения на поверхности пластины будут равны нулю, а балку, нагруженную таким изгибающим моментом, можно использовать в качестве нуль-эталоны.

Возможные варианты нагружения пластины приведены на рис. 4. Измерения проводятся в точках A (схема чистого изгиба) или B (схема консольной балки).



$$M_{\max} = Pa; \quad y_A = \frac{Pa}{24EJ} (3l^2 - 4a^2)$$

а



$$M_{\max} = Pl; \quad M_B = P(l - a); \quad y_A = \frac{Pl^3}{3EJ}$$

б

Рис. 4. Варианты нагружения пластины: а – схема чистого изгиба; б – схема консольной балки

При проведении измерений пластина нагружается и разгружается ступенчато. Нагрузки предварительно рассчитываются. На каждой ступени нагружения фиксируется прогиб пластины с помощью цифрового или стрелочного индикатора). Строится график нагружения и разгрузки. Это позволяет оценить величину петли гистерезиса.

Предложенная выше процедура калибровки может быть использована и при использовании метода ШБ, однако лучше проводить калибровку параллельно с методом РД, для того чтобы выявить корреляцию величины магнитошумового параметра с численным значением RS_1 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

Список литературы

1. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. – 1945. – № 6. – С. 583.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1963. – 230 с.
3. Финк К., Рорбах Х. Измерение напряжений и деформаций. – М.: Машгиз, 1961. – 535 с.
4. Васильев Д.М. Дифракционные методы исследования. – М.: Металлургия, 1977. – 248 с.
5. Barkhausen H. Zwei mit Hilfe der neun Verstärker entdeckte Erscheinungen // Phys. Zs. – 1919. – № 20. – P. 401–403.
6. Металловедение и термическая обработка стали: справ. изд.: в 3 т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
7. Ривкин Е.Ю., Родченков Б.С., Филатов В.М. Прочность сплавов циркония. – М.: Атомиздат, 1974. – 168 с.
8. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1970. – 544 с.

References

1. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. Analiz napriazhennogo sostoianiia v sheike rastianutogo obraztsa [Analysis of the stress state in the neck of stretched samples]. *Zavodskaia laboratoriia*, 1945, no. 6, p. 583.
2. Birger I.A. Ostatochnye napriazheniia [Residual stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1963. 230 p.
3. Fink K., Rorbakh Kh. Izmerenie napriazhenii i deformatsii [Measurement of stress and deformations]. Moscow: Mashgiz, 1961. 535 p.
4. Vasil'ev D.M. Difraktsionnye metody [The diffraction methods]. Moscow: Metallurgiiia, 1977. 248 p.
5. Barkhausen H. Zwei neun mit Hilfe der Verstärker entdeckte Erscheinungen. *Phys. Zs.*, 1919, no. 20, pp. 401-403.
6. Metallovedenie i termicheskaia obrbotka stali [The metallography and heat treatment of steel]. Ed. by M.L. Bernshtein, A.G. Rakhshadt. Moscow: Metallurgiiia, 1983. 352 p.
7. Rivkin E.Iu., Rodchenkov B.S., Filatov V.M. Prochnost' splavov tsirkoniia [The strength of the zirconium alloys]. Moscow: Atomizdat, 1974. 168 p.
8. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: Nauka, 1970. 544 p.

Получено 10.09.2016

Об авторах

Трофимов Виктор Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tvn@mail.ru).

Карманов Вадим Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Ширяев Алексей Александрович (Пермь, Россия) – магистр, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alex_sh_23-1@mail.ru).

About the authors

Viktor N. Trofimov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Dynamics and Strength of Machine, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tvn@mail.ru).

Vadim V. Karmanov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Innovation Engineering Technologies, Perm National Research Politechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Aleksei A. Shiriaev (Perm, Russian Federation) – Master, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alex_sh_23-1@mail.ru).