

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*В.С. Плешанов, В.В. Кибиткин, А.А. Напряшкин, А.И. Солодушкин
г. Томск, Россия*

Данный метод основан на компьютерной обработке двух оптических изображений поверхности, полученных в процессе механического нагружения материалов. его особенностями являются простота проведения измерений и слабая зависимость абсолютной погрешности от степени деформации и вида материала (металл, неметалл).

Реализованный на базе данного метода в ИФПМ СО РАН лабораторный измерительный комплекс TOMSC показал свою эффективность при исследовании процессов поведения нагруженных материалов. Комплекс включает в себя оптический микроскоп, цифровую видеокамеру и компьютер для обработки цифровых изображений. Он позволяет измерять (вычислять) распределение амплитуд смещений элементарных участков поверхности в широком диапазоне (0,2–15 мкм) с высоко разрешающей способностью (плотность векторов смещений 10^3 – 10^5 мм⁻²). С помощью этого комплекса был выполнен ряд исследований механизмов деформации и разрушения металлических материалов и показана возможность диагностики их механического состояния.

В процессе внешнего механического воздействия происходит необратимое формоизменение материала, а его внутренняя структура накапливает необратимые повреждения. В механике деформируемого твердого тела пластическое течение однозначно описывается в терминах полей векторов смещений и компонент тензора деформации. В условиях упругого деформирования связь пространственных полей напряжений и деформаций наиболее проста. Исследование эволюции пластического течения позволяет понять механизм развития разрушения, прогнозировать поведение материала (конструкции) и оценивать текущее механическое состояние. Комплексирование с другими методами неразрушающего контроля позволит снизить погрешность таких измерений.

Существует ряд методов измерения малых деформаций, таких как метод фотоупругости, муара, голографии, спекл-интерферометрии, шеарографии и др. Однако эти методы ограничены диапазоном измеряемой деформации, разрешающей способности или/и сложностью измерения и обработки данных.

Метод корреляции цифровых изображений впервые был предложен группой исследователей университета в Южная Каролина в 1982 г. [1, 2]. В дальнейшем он дорабатывался и совершенствовался. Реализованный на базе данного метода в ИФПМ СО РАН лабораторный измерительный комплекс TOMSC показал свою эффективность при исследовании процессов поведения нагруженных материалов [3].

Данный метод основан на компьютерной обработке двух оптических изображений поверхности, полученных в процессе механического нагружения материалов. Его особенностями являются простота проведения измерений и слабая зависимость абсолютной погрешности измерения отдельного вектора от степени деформации и вида материала (металл, неметалл).

Комплекс включает в себя оптический микроскоп, цифровую видеокамеру и компьютер для обработки цифровых изображений. Он позволяет измерять (вычислять) распределение амплитуд смещений элементарных участков поверхности в широком диапазоне (0,2–15 мкм) с высокой разрешающей способностью (плотность векторов смещений 10^3 – 10^5 мм⁻²). С помощью этого комплекса был выполнен ряд исследований механизмов деформации и разрушения металлических материалов и показана возможность диагностики их механического состояния.

Методика измерения заключается в следующем. Изображение контролируемого участка поверхности с оптического микроскопа поступает на вход видео камеры и далее записывается на жесткий диск компьютера в виде файла. Затем образец подвергается некоторому механическому нагружению, например, циклическому растяжению и с того же участка поверхности фиксируется второе изображение. Компьютерная обработка этих файлов позволяет рассчитать (измерить) поле векторов смещений. Это поле смещений представляет собой смещения элементарных участков поверхности с некоторыми амплитудами и направлениями. Под "элементарным участком" понимается некоторый участок поверхности, размеры которого стремятся к нулю.

Признаком идентификации координат такой площадки [3] является условие (1):

$$S(x, y, u_x, u_y) = \sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} |F_{1,(x+i),y+j} - F_{2,(x+ix+i),(y+iy+j)}| \rightarrow \min(u_x, u_y), \quad (1)$$

где n – размер элементарной площадки;

x, y – координаты элементарной площадки;

u_x, u_y – проекции вектора смещения. Совокупность полученных векторов позволяет построить поле векторов смещений (2).

$$\vec{u}(x, y) = u_x(x, y)\vec{e}_x + u_y(x, y)\vec{e}_y. \quad (2)$$

Здесь \vec{e}_x, \vec{e}_y – единичные орты. Компоненты тензора деформации $\varepsilon_{i,j}$ и главный пластический сдвиг γ рассчитываются на основе уравнений механики деформируемого твердого тела для плоского случая.

$$\varepsilon_{xx} = \partial u_x / \partial x, \quad \varepsilon_{yy} = \partial u_y / \partial y, \quad \varepsilon_{xy} = (\partial u_y / \partial x + \partial u_x / \partial y) / 2$$

$$\gamma = [(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4(\varepsilon_{xy})^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Поля смещений характеризуют реакцию материала на внешнее силовое воздействие, а главный пластический сдвиг отражает степень деформации.

Размер контролируемых участков поверхности зависит от параметров оптической системы и может изменяться в пределах $(0,1 \times 0,1 - 10 \times 10)$ мм², в то время, как пространственная плотность векторов смещений изменяется в диапазоне $10^3 - 10^5$ мм⁻². Конкретное значение размера контролируемого участка определяется оптическим увеличением микроскопа, зависит от ряда факторов (материал, условия нагружения, геометрия объекта контроля и др.) и, как правило, подбирается экспериментально.

Для более точного измерения годографа смещений и амплитуд необходимо выполнение условий (4)–(7) [4].

$$1 \leq \Delta N \ll N_\Sigma \quad (4)$$

$$2a \leq |(\partial u / \partial N)| \Delta N \leq 10a \quad (5)$$

$$\Delta N \rightarrow \min \quad (6)$$

$$|(\partial u / \partial N) \Delta N| \rightarrow \max. \quad (7)$$

где u – модуль некоторого среднего вектора смещений;

N_Σ – количество циклов до разрушения;

a – межпиксельное расстояние видео камеры.

В условии (4) нижний предел ограничен минимально возможной циклической нагрузкой – одним циклом, второй знак неравенства отражает условие измерения годографа перемещений элементарного участка поверхности и его скорости. В (5) нижний предел определяется чувствительностью комплекса, а верхний – максимальным значением вектора смещения элементарного участка поверхности. Условия (6) и (7) находят-

ся в некотором противоречии и отражают желание измерить как годограф, так и вектор с минимальной погрешностью. Одновременное выполнение условий (4)–(7) позволяет выбирать параметры измерительного комплекса, адекватные эксперименту.

При наличии в конструкции усталостных трещин ее дальнейшая эксплуатация в условиях живучести может быть возможна еще в течение значительного времени. В том случае важно диагностировать текущее механическое состояние материала и меть возможность вовремя определить состояние предразрушения, чтобы принять необходимые меры для предотвращения аварийных ситуаций.

В качестве параметра, отражающего состояние нагруженного сварного соединения, используют циклическое отношение $v = N/N_{\Sigma}$, где N – текущее значение циклической нагрузки. Оно может принимать значения $0 \leq v \leq 1$. Время эксплуатации изделия эквивалентно N и, как правило, известно. Экспериментальное определение значения циклического отношения v на основе того или иного критерия (или их совокупности) позволяет оценить срок службы изделия из соотношения $N_{\Sigma} = N/v$. Систематическая оценка времени жизни конструкции N_{Σ} должна, по всей видимости, иметь некоторый асимптотический характер.

Принципиальная возможность применения данного метода на практике ранее была ранее показана, в частности, на примере сварных соединений конструкционной низколегированной стали 10Г2С в условиях многоциклового усталости [5, 6]. Распределение средних значений главного пластического сдвига $\gamma_{pl}(x,y)$ для поля смещений, изображенного на рис. 1, а, приведено на рис. 1, б. Оно отражает деформационную структуру вершины усталостной трещины. Значения $\gamma_{pl}(x,y)$ рассчитывались по формуле (8).

$$\gamma_{pl}(x,y) = [(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2]^{1/2}/\Delta N, \quad (8)$$

где ΔN – приращение циклической нагрузки.

Из рис. 1 следует, что структура вершины усталостной трещины включает в себя зону непосредственно перед ее вершиной и две боковые полосы пластичности, угол между границами которых в эксперименте составлял $\pm(45-60^\circ)$. Видно, что процесс накопления повреждений протекает наиболее интенсивно перед вершиной трещины, где значения γ_{pl} в 3–4 раза выше, чем в полосах пластичности.

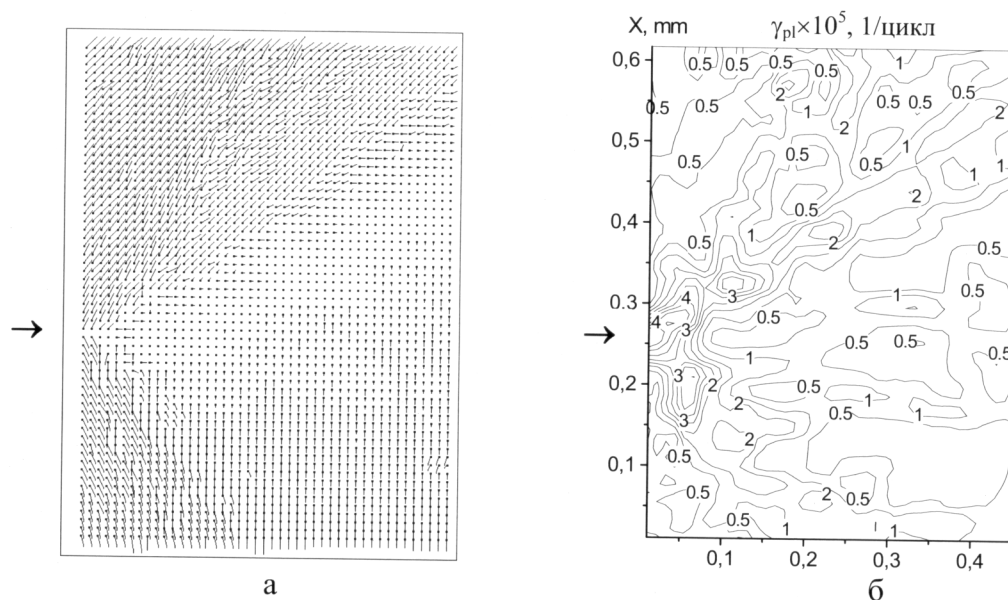


Рис. 1. Поле векторов смещений перед вершиной усталостной трещины (а) и соответствующее распределение значений удельного главного пластического сдвига γ_{pl} (б). $v=0,73$, $\Delta v=1,2 \times 10^{-2}$. Положение вершины трещины указано стрелкой

Зависимости средних значений $\gamma_{pl}(\nu)$ в вершинах доминирующей трещины и в полосах пластичности представлены на рис. 2. Из рисунка следует, что с ростом циклической нагрузки значения γ_{pl} в целом экспоненциально растут, в наблюдаемом диапазоне изменяются приблизительно на три порядка и для обеих вершин трещины примерно равны. Количественные значения γ_{pl} в окрестности вершин трещины являются однозначным критерием степени накопления усталостных повреждений в сварных соединениях вплоть до их разрушения.

Другим критерием, характеризующим механическое состояние циклически нагруженного сварного соединения, является размах раскрытия вершины усталостной трещины u_x^Σ . Он вычисляется по формуле:

$$u_x^\Sigma = |u_x^r - u_x^l|, \quad (9)$$

где u_x^r (u_x^l) – проекции необратимых смещений на направление приложенной силы справа (слева) от вершины, измеренные непосредственно перед вершиной трещины. Такой подход позволяет учесть встречающуюся в эксперименте несимметрию полей смещений и устранить влияние постоянной составляющей, с точностью до которой измеряются поля векторов смещений.

Ранее Дагдейлом было показано, что поперечный размер зоны пластического течения δ перед вершиной трещины (плоское напряженное состояние) как деформационный параметр трещиностойкости позволяет определить значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I или J-интеграла [7]. Экспериментальные исследования украинской школы (Трощенко В.Т., Панасюк В.В. и др.) доказали необходимость введения в это определяющее соотношение поправочного коэффициента [8].

Соответствующая зависимость имеет вид:

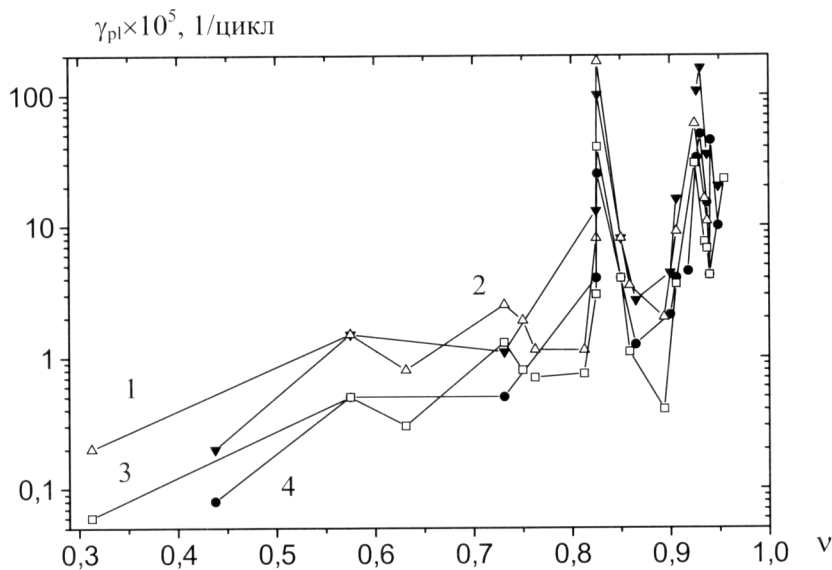


Рис. 2. Зависимости удельного главного пластического сдвига γ_{pl} в вершинах трещины (1, 2) и в полосах пластичности (3, 4) от циклического отношения ν

$$\delta = \alpha K_I^2 / (\sigma_T E), \quad (10)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений;

σ_T – предел текучести;

E – модуль Юнга;

α – некоторая константа (поправочный коэффициент). В настоящем эксперименте $\alpha = 2$.

Зависимости $u_x^\Sigma(v)$ и $\delta(v)$ показаны на рис. 3.

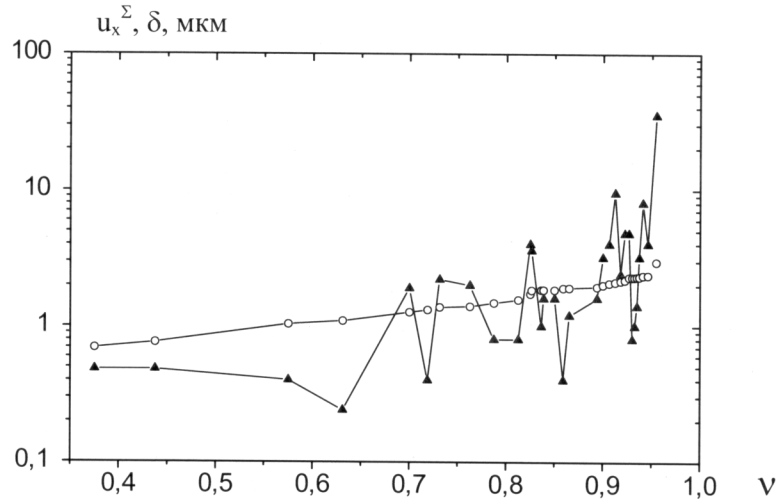


Рис. 3. Зависимости размаха раскрытия вершины трещины u_x^Σ (\blacktriangle , эксперимент) и ширины полосы пластической деформации перед вершиной трещины δ (\circ , теория) от циклического отношения ν

Видно, что с ростом длины трещины наблюдается сближение экспериментальной $u_x^\Sigma(v)$ и теоретической $\delta(v)$ зависимостей. Это позволяет определить текущее K_I и критическое K_{IC} значения КИН для заданного типа материала, условий нагружения и типа сварки по формуле

$$K_I = [u_x^\Sigma \sigma_T E / \alpha]^{1/2}. \quad (11)$$

Использование для этой цели формулы $K_I = \sigma[\pi L]^{1/2} F$, учитывающей длину трещины L , затруднено в связи с неизвестным в общем случае значением геометрического фактора F . Определив для нескольких образцов среднее значение K_{IC} , можно непосредственно в процессе действия циклической нагрузки оценивать текущие значения запаса усталостной прочности сварного соединения:

$$\Delta K(v) = K_{IC} - K_I(v). \quad (12)$$

Критерием, характеризующим приближение материала к разрушению, является $\Delta K(v) \rightarrow 0$.

Для оценки состояния циклически нагруженного сварного соединения можно использовать также такой критерий, как скорость раскрытия вершины усталостной трещины, которая вычисляется по формуле:

$$v_x^\Sigma = u_x^\Sigma / \Delta N. \quad (13)$$

Зависимости $v_x^\Sigma(v)$ для обеих вершин усталостной трещины показаны на рис. 4. Они имеют более гладкий характер по сравнению с $u_x^\Sigma(v)$ и изменяются в более широком диапазоне. Наступление состояния предразрушения связано с отдельными скачками скорости раскрытия вершин. Высокие значения скорости раскрытия вершин трещины не всегда совпадают со значительным ее ростом в длину, но всегда предшествуют этому. Эти зависимости могут быть аппроксимированы уравнением

$$v_x^\Sigma = v_{x0} \cdot \exp(\beta \nu). \quad (14)$$

В данном случае $v_{x0} = 0,19$ нм/цикл, $\beta = 11$. Физически это означает, что усталостные повреждения начинают формироваться с самого начала воздействия внешней силы ($\nu \sim 0$) на микроуровне в зонах микроконцентраторов напряжений, при этом характерный масштаб повреждений соизмерим с постоянной решетки железа (0,29 нм).

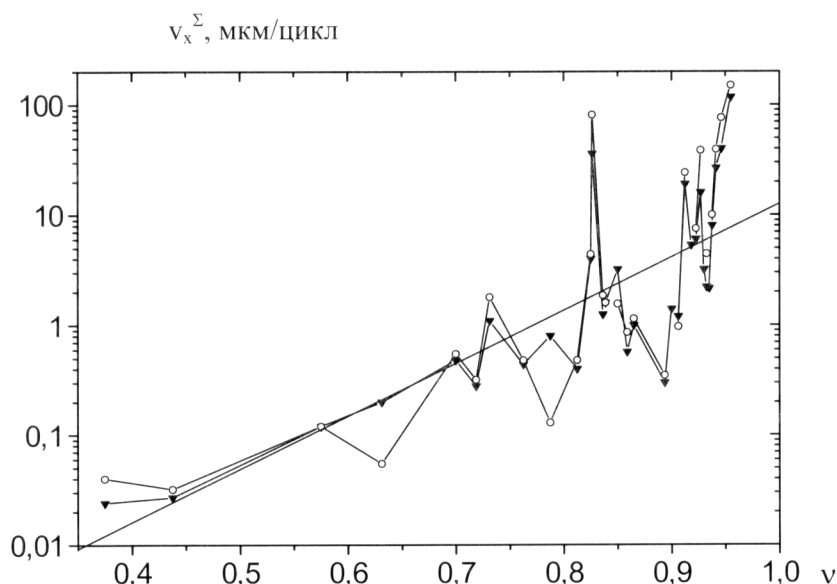


Рис. 4. Скорости раскрытия вершин усталостной трещины v_x^Σ в зависимости от циклического отношения ν

Изложенные результаты свидетельствуют, что применение метода корреляции цифровых изображений позволяет оценивать накопление усталостных повреждений в материале. Благодаря высокой разрешающей способности и малой погрешности измерений векторов смещений появилась возможность измерять значения локальных пластических деформаций в окрестности вершин усталостных трещин и на основе этого ввести новые количественные критерии диагностики механического состояния циклически нагруженных материалов (конструкций).

В качестве таких критериев могут выступать удельный главный пластический сдвиг γ_{pl} , размах u_x^Σ и скорость v_x^Σ раскрытия вершины усталостной трещины. Их количественные значения характеризуют текущее механическое состояние сварных соединений с трещиной, а сильно выраженные скачки при некоторых значениях $\nu_{lim} < 1$ свидетельствуют о переходе трещин к магистральному характеру развития и достижении предельного состояния (состояния предразрушения) нагруженного материала в целом. Это состояние предшествует глобальному разрушению. Значения ν_{lim} в реальных условиях эксплуатации выбирают, исходя из заданного уровня требований к надежности конкретной металлоконструкции в условиях живучести. Размах раскрытия вершин трещины u_x^Σ также позволяет на основе модели Дагдейла рассчитывать текущие значения такого универсального параметра трещиностойкости, как коэффициент интенсивности напряжений K_I . Сравнивая полученные текущие значения K_I с критическим для данного материала значением K_{IC} , можно в любой момент эксплуатации металлоконструкции диагностировать запас ее усталостной прочности и прогнозировать остаточный ресурс работы.

Достоинство изложенного выше метода диагностики усталости металла состоит в том, что при приближении нагруженной конструкции к состоянию предразрушения точность измерений возрастает, а сам процесс разрушения становится контролируемым. Это позволяет эффективно использовать метод корреляции цифровых изображений и соответствующий измерительный комплекс как в качестве самостоятельного метода диагностики, так и для градуировки других приборов неразрушающего контроля.

Список литературы

1. Peters W.H., Ranson W.F. Digital imaging technique in experimental stress analysis // Optical Engineering. – 1982. – V. 21. – P. 427–432.

2. Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeil S.R. Determination of displacements using an improved digital image correlation method, *Image Vision Computing*. – 1982. – V. 1. – № 3. – P. 133–139.
3. Панин В.Е., Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Сапожников С.В. Анализ полей векторов смещений и диагностика усталостного разрушения алюминиевого сплава на мезоуровне // *Дефектоскопия*. – 1998. – № 2. – С. 80–87.
4. Kibitkin V.V., Pleshanov V.S., Lebedeva N.A., Panin V.E. Mechanical state diagnosis and prefracture of welded joints under fatiguing on the basis of mesoscale criteria, *CORUS 2004 (Materials science): Proceedings of the 8th Korea – Russia International Symposium on Science and Technology*. – June 26 – July 3, 2004, Tomsk Polytechnic University & University of Ulsan & Novosibirsk State Technical University, Russia. – V. 3. – P. 119–121.
5. Плешанов В.С., Панин В.Е., Кибиткин В.В., Лебедева Н.А. Эволюция мезоструктуры и кинетика накопления усталостных повреждений в сварных соединениях конструкционной стали в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию // *Физическая мезомеханика*. – 2001. – Т. 4. – № 6. – С. 105–117.
6. Плешанов В.С., Панин В.Е., Кибиткин В.В., Лебедева Н.А. Мезомасштабные критерии диагностики механического состояния и предразрушения циклически нагруженных сварных соединений // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2003. – № 2. – С. 117–124.
7. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits // *J. Mechanics and Physics of Solids*. – 1960. – V. 8. – № 2. – P. 100–108.
8. *Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие / под ред. В.В. Панасюка*. – Т. 4. – Киев: Наукова думка, 1990. – 680 с.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*О.С. Качин
Томск, Россия*

В публикации рассмотрена методика определения вибрационных параметров работы подшипниковых узлов в динамических режимах при помощи измерительных систем для контактного или бесконтактного контроля механического состояния элементов машин.

Определение вибрационных параметров работы подшипниковых узлов, а также динамики их изменения во времени является актуальной проблемой в диагностике элементов машин и механизмов, а также в прогнозировании их ресурса.

В данной публикации рассмотрена методика определения радиального перемещения, скорости и ускорения внутреннего кольца подшипника относительно внешнего (или наоборот) в динамических режимах работы при помощи созданного в Томском политехническом университете (ТПУ) программно-аппаратного измерительного комплекса для бесконтактного контроля механического состояния элементов машин [1]. Следует отметить, что данная методика может быть использована и для других бесконтактных измерительных систем, реализованных на основе вихретоковых, оптических или иных типов измерительных датчиков, позволяющих определять расстояние до контролируемой поверхности. Методика также может быть применена и для контактных измерительных систем.