

УДК 621,9

И.Н. Одинцев, А.А. Апальков, А.М. Кокуров, Т.П. Плугатарь, С.М. Усов
ИМАШ РАН, Москва, Россия
Тел./Факс: +7 (499) 135 7751; E-mail: ino54@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Документ содержит краткое описание теоретических и практических аспектов оптико-корреляционных методов в экспериментальной механике: цифровой шаблон интерферометрии и цифровых изображений корреляции. Эти методы используются для бесконтактных и высокоточной идентификации перемещения полей на поверхностях деформируемого тела. Приведены примеры их применения и некоторые полученные результаты.

Ключевые слова: шаблон интерферометрии, цифровое изображение корреляции, поле перемещений, механических свойств материала, остаточных напряжений, механика экспериментального разрушения, неразрушающий контроль.

I.Odintsev, A. Apal'kov, A. Komarov, T. Pluginuri, S. Usov

THE APPLICATION OF OPTICAL CORRELATION TECHNIQUES IN PROBLEMS OF EXPERIMENTAL MECHANICS

The paper provides a brief description of theoretical and practical aspects of the optics correlation methods in experimental mechanics: digital speckle pattern interferometry and digital image correlation. These methods are used for contactless and high-precision identification of displacements fields on deformed body surfaces. Examples of their applications and some received results are given.

Key words: speckle pattern interferometry, digital image correlation, displacements field, material mechanical properties, residual stress, experimental fracture mechanics, nondestructive testing.

Возрастающие требования к обеспечению прочности и надежности современных конструкций на фоне их усложнения и расширения перечня рабочих условий, а также стремление к увеличению сроков эксплуатации действующих объектов могут удовлетворяться на основе достоверного знания, в частности, параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) составляющих элементов и деталей. Известно, что реальные характеристики НДС в натурной конструкции могут заметно отличаться от их расчетных оценок. Это обусловлено такими факторами как использование не вполне адекватных, ограниченных расчетных моделей, неполнота или неточность информации о действующих нагрузках и других рабочих параметрах, наличие остаточных технологических напряжений в материале и пр. Поэтому успешное решение поставленных задач с необходимостью опирается на активное применение методологии экспериментального анализа механических состояний объектов.

Среди богатого арсенала современных средств экспериментальной механики особое место занимает специальный класс оптических методов регистрации деформированного состояния [1 - 3]. Помимо обеспечения высокой точности и бесконтактного характера измерений, преимущество данных методов состоит в получении континуальной информации о полных полях деформационных перемещений на всей поверхности исследуемых элементов конструкций или образцов для определения механических свойств материалов. Математическая обработка первичных результатов эксперимента позволяет определять дифференциальные характеристики НДС – напряжения или деформации, а также интегральные величины – действующие нагрузки, параметры механики разрушения и др. Самостоятельным приложением данных средств измерений является дефектоскопия деталей.

В последнее время широкое практическое распространение в качестве инструмента для регистрации деформированного состояния тел получил метод электронной цифровой корреляционной спекл-интерферометрии (ЭЦСИ) [3 - 5]. Напомним [6], что оптическое изображение реальных объектов, освещенных лазерным светом, микронеднородно и состоит из отдельных пятен – спеклов. При использовании ЭЦСИ информация о текущем состоянии поверхности исследуемого объекта (спекл-структуре) регистрируется цифровой видеокамерой, поступает в компьютер и оцифровывается в значениях случайной функции интенсивности изображения. Затем производится компьютерное вычитание двух спекл-структур (из полного массива зарегистрированных изображений), отвечающих различным состояниям объекта. В результате на мониторе компьютера наблюдается изображение объекта, покрытое системой, так называемых, полос корреляции. Каждая из этих полос представляет собой область периодически восстанавливаемого корреляционного соответствия случайных спекл-полей. Порядки полос связываются со значениями заданной компоненты векторного поля перемещений, имевшими место в процессе нагружения исследуемого объекта в реальном времени или между заданными моментами регистрации изображений. Различные оптические схемы спекл-интерферометра позволяют измерять требуемые (априори установленные) пространственные компоненты полного вектора перемещений. Кроме того, спекл-интерферометрия может быть реализована также и в режиме усреднения по времени фазовых приращений волн, рассеянных поверхностью движущегося тела. Если при этом объект совершает гармонические колебания по той или иной форме, то регистрируемые картины полос будут описывать поля амплитуд колебаний в виде изолиний (линий уровня).

Метод ЭЦСИ представляет собой эффективный инструмент для исследования деформационных характеристик конструкционных материалов, особенно неординарных по своим свойствам. Присущий ему характер измерений позволяет не только определять величину деформации образца, но и непосредственно в ходе эксперимента выявлять отклонения от принятой схемы его деформирования, что способствует повышению достоверности результатов. С другой стороны, появляется возможность создания принципиально новых методических разработок, для осуществления которых методы континуальных измерений почти безальтернативны. В частности, для исследования свойств листовых композитных материалов, которые находят все более активное применение в авиастроении, эффективной оказывается методика, основанная на испытаниях образца в виде круглого диска, деформируемого изгибающей нагрузкой с поэтапным изменением точек ее приложения. Такой подход позволяет на одном образце определить весь комплекс деформационных характеристик анизотропного композита [7]. Параллельно тот же образец при его вибрационном нагружении с регистрацией собственных частот и форм колебаний может служить для установления динамических характеристик упругости материала. В качестве иллюстрации, на рисунке 1 демонстрируются типичные спекл-интерферограммы, полученные при статических и вибрационных испытаниях подобного образца.

Одним из наиболее востребованных приложений ЭЦСИ в настоящее время является его использование в качестве своеобразного датчика деформаций при исследованиях остаточных напряжений (ОН) разрушающимися методами [3, 5, 8 - 11]. При этом широко распространенным на практике способом механического воздействия на исследуемый объект является высверловка малоразмерного отверстия. Обнуление компонент ОН на образующейся свободной поверхности приводит к возникновению соответствующего деформационного отклика материала, регистрируемого с помощью ЭЦСИ. В

качестве характеристик данного отклика для восстановления компонент ОН достаточно рассматривать лишь поля тангенциальных перемещений в зоне засверловки отверстия-индикатора.

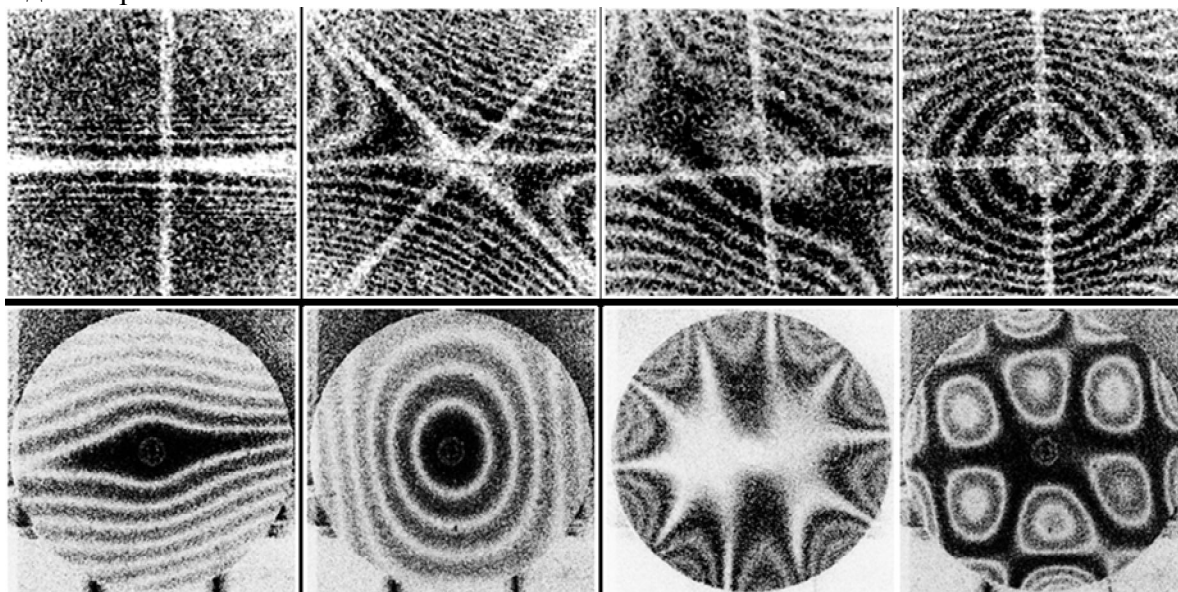


Рис. 1. Спекл-интерферогаммы изгибного статического (верхний ряд) и вибрационного (нижний ряд) деформирования образца в виде круглого диска из анизотропного композитного материала (углепластика).

Типичные спекл-интерферогаммы таких перемещений демонстрируются на рисунках 2 а, б. Картины полос образуют характерные симметричные розетки или имеют более сложный вид, если присутствуют дополнительные случайные жесткие смещения объекта относительно измерительной системы. К усложнению вида интерферогамм ведет также разориентировка главных осей ОН относительно осей чувствительности частных интерферометров. Обработка получаемых картин полос в терминах компонент ОН выполняется на основе сопоставления получаемых экспериментальных данных с результатами моделирования задачи аналитически или численно, например, с помощью метода конечных элементов.

Другим применяемым видом разрушающего воздействия с целью определения ОН является создание в исследуемом объекте узких пропилов [3, 5]. На рисунке 3 б сквозной пропил «стартует» в радиальном направлении от контура имеющегося конструктивного отверстия в объекте типа пластины, что дает возможность оценки локального значения окружной компоненты напряжений. На рисунке 3в представлена спекл-интерферогамма перемещений в окрестности сегментообразного поперечного пропила, выполненного в объекте-трубке \varnothing 15 мм со сварным швом.

Эксперименты с использованием ЭЦСИ могут осуществляться на специальном виброизолированном оптическом столе (стенде). Вместе с тем, важной особенностью метода является возможность его внелабораторной реализации [11 – 14]. Так, на рисунке 3 а демонстрируется один из вариантов переносной установки, разработанной в ИМАШ РАН для исследования ОН в натуральных элементах конструкций в полевых условиях. Самостоятельным направлением является создание специализированных мобильных спекл-интерферометров для регистрации полей перемещений в образцах при их испытаниях (статических, циклических) на стандартных испытательных машинах [15]. В этом случае интерферометр закрепляется непосредственно на неподвижном за-

хвате машины, что позволяет выполнять необходимые измерения в процессе экспериментов. Автономность работы измерительной системы здесь, как и ранее, обеспечивается применением малогабаритных комплектующих: источника когерентного излучения (лазера) и цифровой видеокамеры.

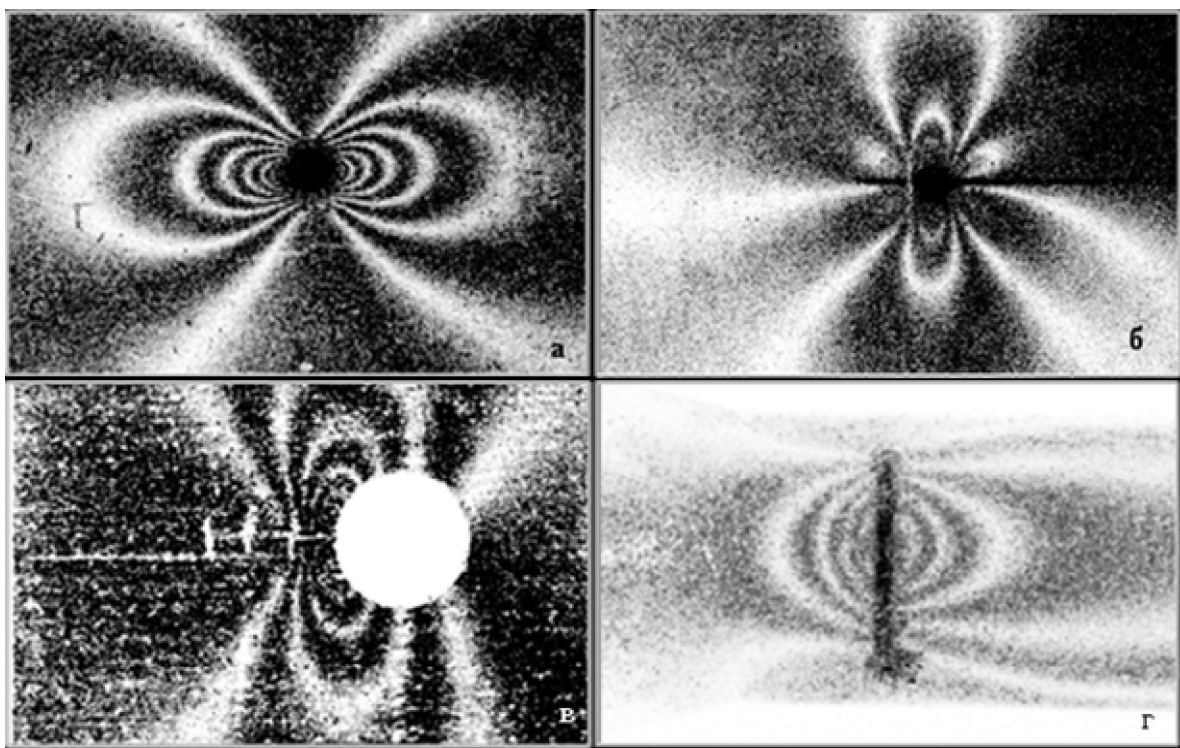


Рис. 2. Типичные спекл-интерферограммы полей тангенциальных перемещений, наблюдаемые в зоне разрушающего воздействия на объект для определения остаточных напряжений: а, б – при высверловке малоразмерного зондирующего отверстия; в, г – при создании узкого пропила.

Определяющее значение для эффективного функционирования интерферометра имеет также его высокая конструкционная жесткость. Вариант такого прибора представлен на рисунке 3 б..

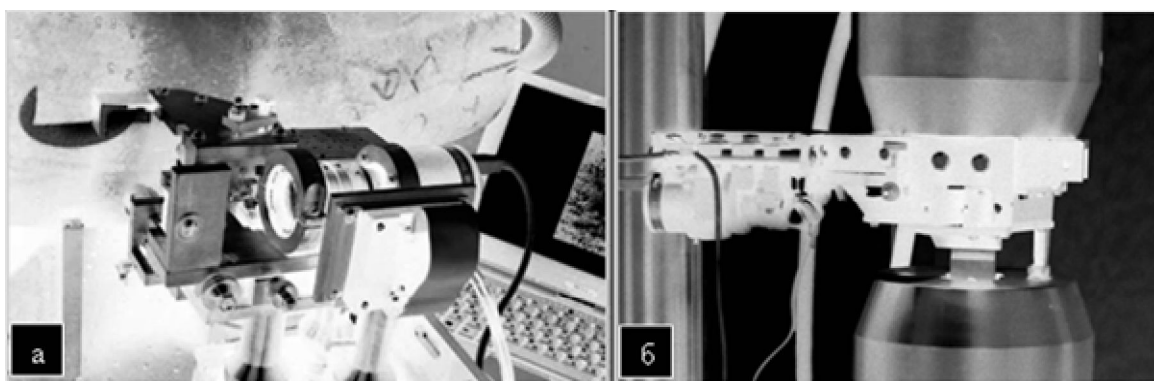


Рис. 3. Варианты автономных спекл-интерферометров: а – для измерения ОН в полевых условиях; б – для работы в составе измерительной системы разрывной испытательной машины.

На рисунке 4 демонстрируются типичные спекл-интерферограммы, зарегистрированные с его помощью при статических и циклических испытаниях образца с концентратором напряжений, изготовленного из авиационного алюминиевого сплава.



Рис. 4. Спекл-интерферограммы осевой компоненты перемещений, зарегистрированные при испытаниях на растяжение плоского образца с круговым концентратором напряжений: а – упругое деформирование; б – остаточное деформирование; в – развитие усталостных трещин.

С целью оперативного контроля за развитием деформаций может быть использована разработанная в ИМАШ РАН управляющая программа, позволяющая наблюдать возникающие картины полос практически в реальном режиме времени. В последнее время быстрыми темпами развивается и активно внедряется в инженерную практику относительно новый метод экспериментальной механики – корреляция цифровых изображений (КЦИ) [16]. Данный метод, как и рассмотренная выше ЭЦСИ, предназначен для анализа деформированного состояния объекта в полевом (континуальном) формате (2D или 3D). В частном варианте он может использоваться и в режиме виртуального оптического линейного тензомера. С его помощью производится отслеживание смещений одних и тех же физических точек на поверхности тела до и после его деформирования. Свидетелями этому являются смещения элементов системы хаотически распределенных по поверхности объекта и неразрывно связанных с ним малоразмерных меток-пятен, именуемых, как и в ЭЦСИ, спекл-структурой. Однако здесь данная система не имеет интерференционно-оптического происхождения, а может быть создана простым дисперсным распылением красящего вещества.

Современные системы КЦИ-измерений (например, серия систем «VIC», США) позволяют анализировать как отклики объекта на статическое нагружение, так и быстротекающие процессы при исследовании динамического формоизменения объектов с помощью высокоскоростных цифровых видеокамер. При этом, для исследования полей деформаций в трехмерном пространстве необходимо использовать стереосистему, включающую две цифровые видеокамеры.

Процедура реализации метода включает в себя три основных этапа:

- подготовка объекта (нанесение спекл-структуры) и настройка системы измерений (калибровка);
- регистрация изображений в процессе деформирования;
- компьютерная обработка цифровых изображений.

Для анализа полей перемещений, очевидно, необходимы, как минимум, два изображения поверхности испытуемого объекта со спекл-структурой, записанные на различных шагах деформирования. В ходе дальнейшей, апостериорной обработки полученных изображений вся поверхность объекта разбивается на фрагменты, и анализируется перемещение спекл-структуры в пределах каждого элементарного окна. При этом

постулируется, что в пределах данного участка распределение перемещений может быть приближено простой и известной по форме функцией, имеющей ограниченный ряд подлежащих определению числовых параметров. В более простых 2D задачах в качестве частных функций могут рассматриваться: тангенциальное смещение участка как целого (параллельный перенос), жесткий поворот, сдвиг, линейная деформация и пр. Полная функция перемещений является линейной суперпозицией данных частных функций. Цифровые изображения обрабатываются с использованием методов корреляционного анализа случайных функций, характеризующих интенсивность (уровни яркости) в каждом пикселе изображения. Фрагменты изображения нагруженного объекта программными средствами смещаются (геометрически варьируются по заданным параметрам) до тех пор, пока соответствующая трансформируемая спекл-структура не будет максимально точно соответствовать структуре на опорном изображении недеформированного тела. Максимум корреляции двух структур определяет искомые параметры функций в пределах каждого элементарного окна.

Далее методами численного анализа вычисляются частные производные от получаемых функций, что позволяет определить компоненты тензора деформаций и поворотов. Результаты измерений могут быть представлены в виде графиков, в форме (полихроматических) трехмерных картин, в виде двумерных картин, совмещенных с изображением деформируемого объекта, а также в виде анимированного изображения, позволяющего наблюдать изменение деформационной картины в процессе нагружения.

Таким образом, методология КЦИ лежит на стыке технологий регистрации изображений с помощью цифровой техники с высоким разрешением, компьютерных методов их обработки, математических методов численного анализа случайных функций, а также определяющих положений механики деформируемого твердого тела. Вместе с появлением современных разработок в данных направлениях расширяется и круг эффективно решаемых задач с помощью этого метода. В качестве примера на рисунке 5 демонстрируются картины полей тангенциальных упругопластических перемещений и деформаций, зарегистрированные методом КЦИ при испытаниях образцов с круговым концентратором напряжений (Об мм) [5]. Здесь, как можно видеть, на реальных полях продольных и поперечных перемещений обнаруживаются вполне заметные искажения, вызванные, по всей видимости, неточностями изготовления или нагружения образца. Вместе с тем, на распределениях деформаций в окрестности концентратора данный фактор существенно менее выражен.

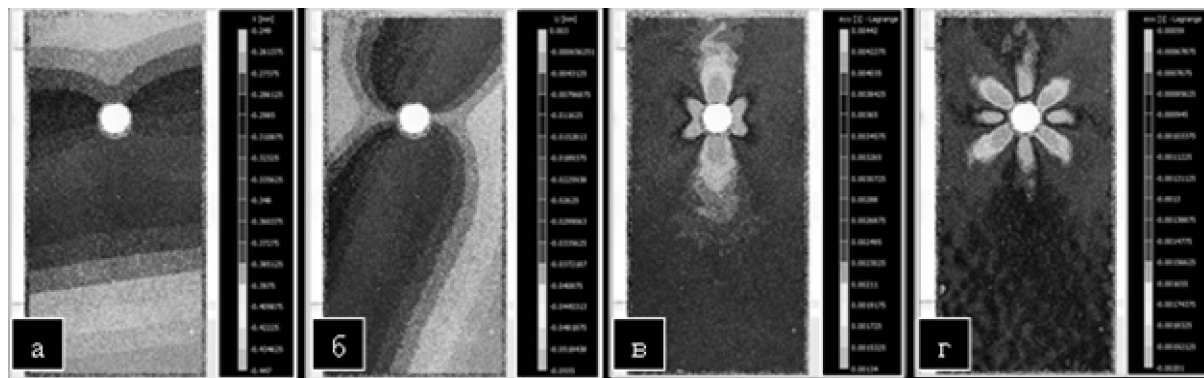


Рис. 5. Картины полей перемещений и деформаций в плоском образце с концентратором напряжений: а – продольных перемещений; б – поперечных перемещений; в – продольных деформаций; г – поперечных деформаций.

На рисунке 6 представлены поля перемещений, полученные в окрестности вершины краевой трещины в элементе конструкции типа пластины при растяжении [17, 18]. Математическая обработка получаемых результатов позволяет оценить значения параметров механики разрушения: коэффициента интенсивности напряжений K_I и T -напряжений.

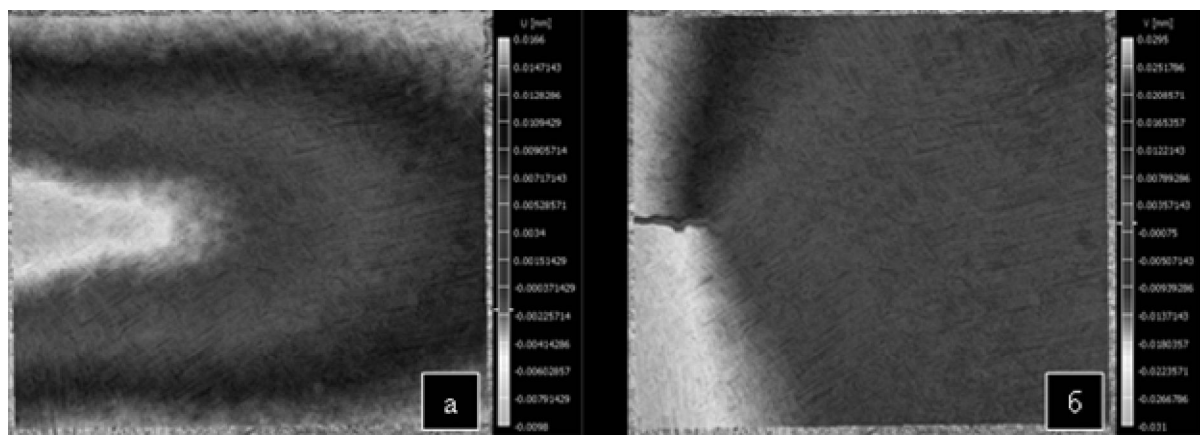


Рис. 6. Поля компонент перемещений в окрестности краевой трещины в элементе конструкции типа пластины при растяжении, полученные методом корреляции цифровых изображений: а – горизонтальной; б – вертикальной (согласно ориентации рисунков).

Метод КЦИ может с успехом применяться и в задачах дефектоскопии реальных элементов конструкций. При наличии дефекта, скрытого от непосредственного наблюдения, его обнаружение может выполняться путем приложения малых тестирующих нагрузок и поиска мест нерегулярности деформационного отклика [19]. Последующая идентификация дефекта, в том числе установление численных значений его геометрических параметров, основывается, как и ранее, на сопоставлении экспериментальных данных с результатами численного моделирования. В качестве иллюстрации, на рисунке 8а представлена картина осевых деформаций на внешней поверхности изгибаемой трубы (цилиндрической оболочки), имеющей трещиноподобный дефект на внутренней поверхности, полученная с помощью численного дифференцирования поля перемещений, зарегистрированного методом КЦИ. Для сравнения, на рисунке 8б демонстрируется соответствующее ожидаемое распределение, рассчитанное с помощью метода конечных элементов. Путем варьирования параметров дефекта в модели и установления максимального корреляционного соответствия между экспериментальными и расчетными данными в данном случае удалось оценить глубину реального дефекта с погрешностью до 7%.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о высокой эффективности средств экспериментальной механики, предоставляющих сведения о деформированном состоянии объектов не в отдельных точках, а в континуальном формате, в частности – современных оптических методов: корреляции цифровых изображений и корреляционной цифровой спекл-интерферометрии. С их использованием открываются новые возможности для анализа НДС, для изучения процессов деформирования и разрушения твердых тел, благодаря значительной по объему и качеству исходной информации, получаемой экспериментатором. Активному внедрению данного инструментария в инженерную практику будет способствовать совершенствование как его аппаратной, так и программной составляющих. Перспективным представляется также сочета-

ние методов КЦИ и ЭЦСИ в едином измерительном комплексе, что существенно расширяет диапазон исследуемых полей перемещений и деформаций.

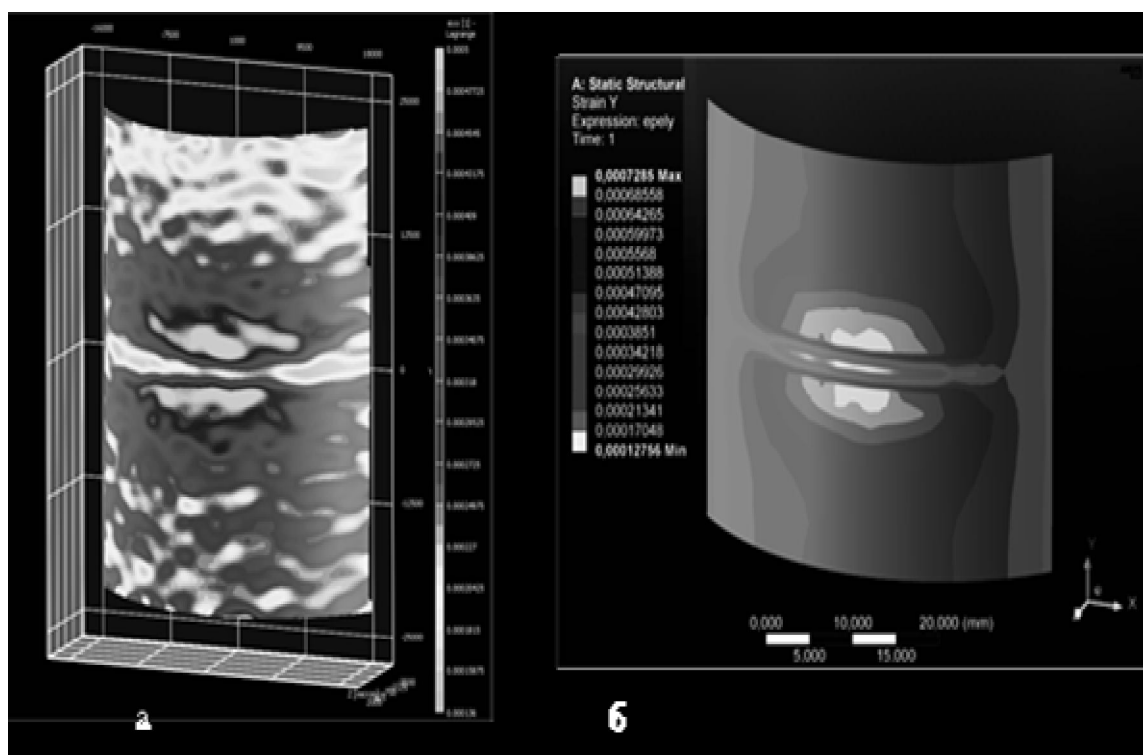


Рис. 8. Поле продольных деформаций на поверхности изгибаемой цилиндрической оболочки со скрытым трещиноподобным дефектом:
а – данные эксперимента с применением КЦИ; б – результат численного моделирования методом конечных элементов

Список литературы:

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир. 1986. – 328 с.
2. Shchepinov V.P., Pisarev V.S., Novikov S.A., Balalov V.V., Odintsev I.N., Bondarenko M.M. Strain and stress analysis by holographic and speckle interferometry. – Chichester: John Wiley & Sons. 1996. – 496 p.
3. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд. МГТУ. 2007. – 240 с.
4. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. / Ed. by P.K. Rastogi. John Wiley & Sons. 2001. – 368 p.
5. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформирования материала оптико-корреляционными методами // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №S4. – С.70-86.
6. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: Мир. 1980. – 171 с.
7. Одинцев И.Н., Чернов А.В. Метод испытания анизотропных материалов с использованием образца-диска // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т.77. – №2. – С.44-50.
8. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Применение электронной спекл-интерферометрии для измерения остаточных напряжений // Заводская лаборатория (Диагностика материалов) – 2002. – Т.68. – №4. – С.48-51.

9. Viotti M.R., Kaufmann G.H. Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004; 41(2): 297-305.

10. Nelson D.V. Residual Stress Determination by Hole Drilling Combined with Optical Methods // *Experimental Mechanics* – (2010) 50 – P.145-158.

11. Apalkov A.A., Odintsev I.N., Usov S.M. Speckle pattern interferometry for measurement of residual stress: basic approach, mathematical support, special arrangement, practical application // *Machines, technologies, materials* – 2015. – № 5. – P.18-20.

12. Viotti M.R., Dolinko A.E., Galizzia G.E., Kaufmann G.H. A portable digital speckle pattern interferometry device to measure residual stresses using the hole drilling technique // *Optics and Lasers in Engineering* – 2006 – V.44. – P. 1052-1066.

13. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследования остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях // *Заводская лаборатория (Диагностика материалов)* – 2008. – Т.74. – №5. – С.47-51.

14. Антонов А.А., Стеглов О.И., Антонов (мл.) А.А., Сидорин Ю.В. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов. // *Заготовительные производства в машиностроении* – 2010. - №3. – С.13-19.

15. Гриневич А.В., Одинцев И.Н., Северов П.Б. Применение цифровой спекл-интерферометрии при испытаниях материалов на усталость. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций», Киев, Украина, 2013, с.84-85.

16. Sutton M.A., Orteu J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 321 p.

17. Усов С.М., Одинцев И.Н. Применение метода корреляции цифровых изображений для исследования процесса деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций / Труды Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение», Москва, 22-24 октября 2012, М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2012. Т.1. С.304-313.

18. Usov S.M., Odintsev I.N. The study of the stress-strain state of objects with using digital image correlation / *Book of abstracts and proceedings of 10th HSTAM International congress on mechanics, Greece*, 2013, p. 101.

19. Усов С.М., Одинцев И.Н. Геометрическая идентификация трещиноподобных дефектов на пластинах и оболочках с использованием метода корреляции цифровых изображений. Тезисы VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 26-30 мая 2014, с.120.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-19-00383.

Поступила в редколлегию 24.04.2015 г.