

**ОПТИКО-КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ:  
ПРИНЦИПЫ, ИНСТРУМЕНТАРИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОПЫТ  
ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**Одинцев И. Н.<sup>1</sup>, Плугатарь Т.П.<sup>1</sup>, Тиан Ш.<sup>2</sup>**

<sup>(1)</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

<sup>(2)</sup>*Сианьский университет Цзяо Тун, Сиань, Китай.*

*E-mail: [ino54@mail.ru](mailto:ino54@mail.ru)*

Успешное решение задач обеспечения прочности и надежности объектов современного машиностроения с необходимостью предполагает активное применение методологии экспериментального анализа. Среди богатого арсенала современных средств экспериментальной механики особое место занимают так называемые оптико-корреляционные методы – электронная цифровая (корреляционная) спекл-интерферометрия (ЭЦСИ) и корреляция цифровых изображений (КЦИ) [1]. Помимо высокой точности и бесконтактного характера измерений, определяющее достоинство данных методов состоит в возможности получения полномасштабной, континуальной информации о полных полях пространственных перемещений на всей визуально доступной поверхности исследуемых объектов. Это обстоятельство существенно повышает уровень достоверности (адекватности) получаемых результатов. Расширенная математическая обработка первичных данных эксперимента позволяет определять деформации и напряжения в интересующей зоне конструкции, а также – при соответствующей постановке обратной задачи – механические свойства материалов, параметры механики разрушения, реальные действующие нагрузки и др. Специалистами ИМАШ РАН (в сотрудничестве с представителями ряда других организаций) осуществляются как целенаправленные разработки новых подходов и методик, базирующихся на применении оптико-корреляционных методов, так и их практическое применение в научных и инженерных исследованиях.

Эффективность полевых методов измерений применительно к задачам экспериментальной механики материалов демонстрируется на примере определения упругих свойств анизотропных листовых композитов. Предложена и апробирована оригинальная методика, основанная на испытаниях круглого диска (пластины), деформируемого в условиях изгиба в трансформируемых схемах нагружения [2]. Такой подход позволяет на одном образце определить весь комплекс деформационных констант материала. Тот же образец при его вибрационном нагружении с регистрацией собственных частот и форм колебаний (методом ЭЦСИ с усреднением по времени) может служить для установления динамических характеристик упругости, рис.1.

Самостоятельное направление в развитии средств измерений на основе ЭЦСИ применительно к исследованию механических свойств материалов состоит в создании мобильных интерферометров для регистрации полей перемещений в образцах при их испытаниях (квазистатических, циклических) на стандартных испытательных машинах [3]. В этом случае компактный оптический прибор закрепляется на неподвижном захвате машины, что позволяет проводить необходимые измерения непосредственно в процессе выполняемых экспериментов, рис.2.

Одним из чрезвычайно востребованных приложений ЭЦСИ в настоящее время является ее использование в качестве максимально информативного датчика деформационного отклика при исследованиях остаточных напряжений (ОН) путем высверловки малоразмерных отверстий-индикаторов [4], рис.3. При этом специально разработанная серия малогабаритных автономных приборов-интерферометров

обеспечивает выполнение измерений ОН в промышленных объектах в полевых (производственных) условиях.

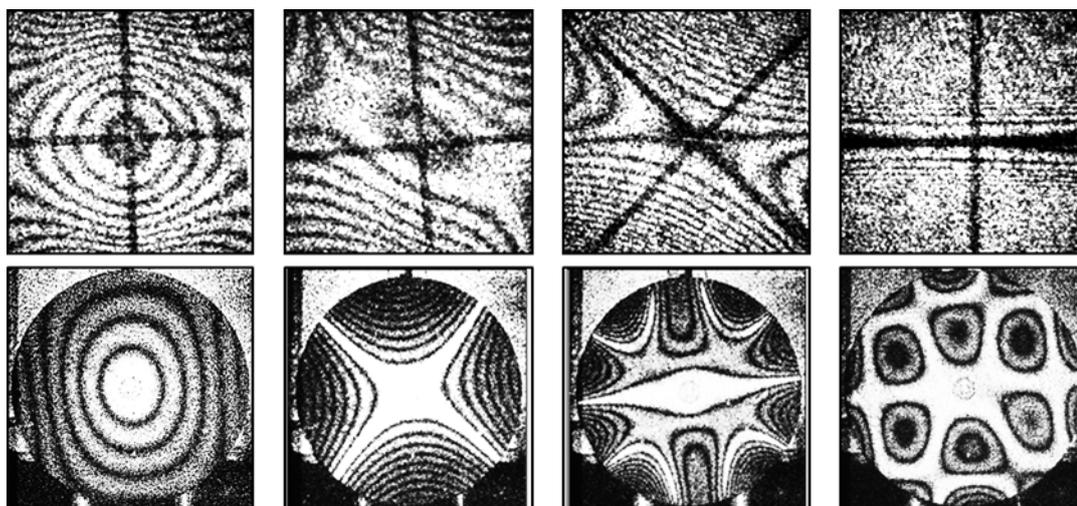


Рисунок 1 - Спекл-интерферограммы квазистатического (верхний ряд) и вибрационного (нижний ряд) изгибного деформирования образца-диска из слоистого углепластика

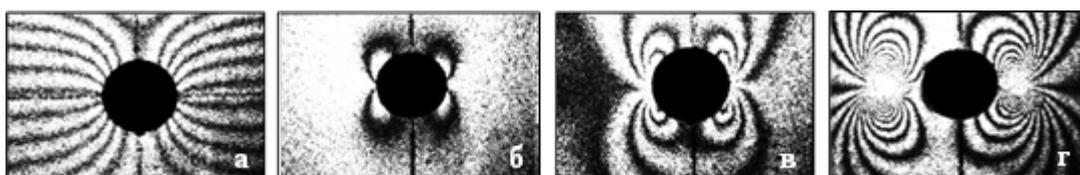


Рисунок 2 - Спекл-интерферограммы полей осевых перемещений в окрестности кругового концентратора напряжений в образце-полосе при растяжении: а – упругое деформирование; б, в – этапы остаточного деформирования целостного образца; г – остаточное деформирование после образования усталостных трещин в ходе циклического нагружения

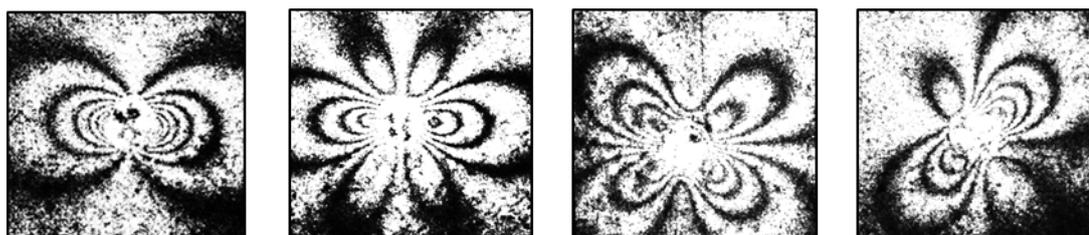


Рисунок 3 - Типичные спекл-интерферограммы, регистрируемые в окрестности малого отверстия-индикатора для определения остаточных напряжений

Применение оптико-корреляционных методов – как ЭЦСИ, так и КЦИ – оказывается весьма эффективным для выполнения фундаментальных и прикладных исследований в области механики трещин, рис. 4. В частности, разработанный аппарат механо-математической интерпретации регистрируемых полей перемещений в окрестности вершины трещины позволяет оценивать характеристики локального поля напряжений, фигурирующие в известной двухпараметрической модели – интенсивность напряжений  $K_I$  и Т-напряжения [5].

Самостоятельной сферой применения рассматриваемых средств измерений является дефектоскопия элементов конструкций. Положение скрытых (подповерхностных) дефектов выявляется по наблюдаемым аномалиям в деформационных откликах, обусловленных приложением к объекту тех или иных малых тестирующих воздействий. Обработка получаемой информации с

привлечением методов численного (конечно-элементного) моделирования позволяет устанавливать геометрические параметры дефектов [5], рис.5.

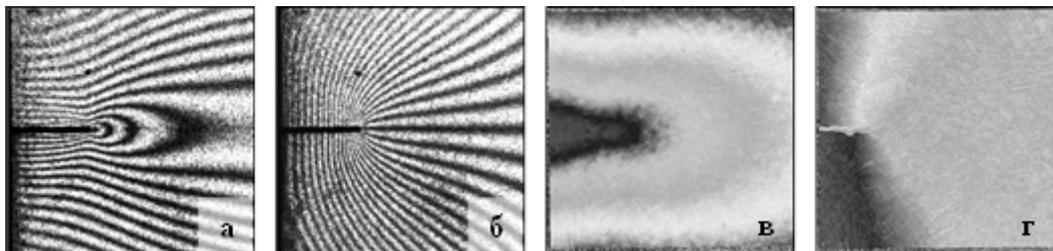


Рисунок 4 - Поля тангенциальных продольных (а, в) и поперечных (б, г) перемещений у вершины краевой трещины (узкого разреза), полученные методами ЭЦИ (а, б) и КЦИ (в, г)

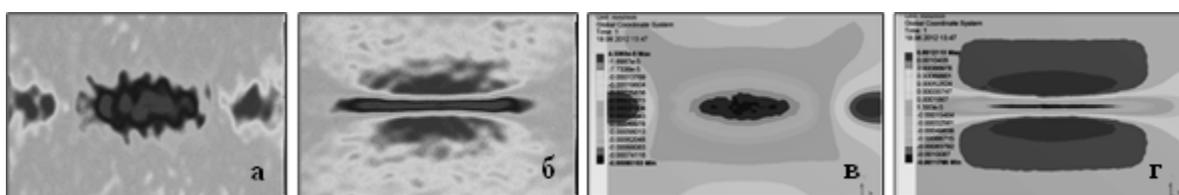


Рисунок 5 - Сопоставление полей тангенциальных компонент тензора деформаций на участке поверхности объекта в зоне скрытого трещиноподобного дефекта: полученных экспериментально методом КЦИ (а, б) и с помощью конечно-элементного моделирования (в, г)

### Список литературы

1. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами. // *Авиационные материалы и технологии*. -2014.- № S4. -С.70-86.
2. Одинцев И.Н., Чернов А.В. Метод испытания анизотропных материалов с использованием образца-диска. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. -2011. -Т.77, № 2. -С.44-51.
3. 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.
4. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных остаточных напряжений при сложных спектрах нагружения. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. -2015. -№ 6. -С.53-62.
5. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Усов С.М. Экспериментально-расчетный анализ трещиноподобных дефектов. / Сборник докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань (РФ), 2015. -С.195-197.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00572 и № 18-58-53020.*