

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА РЕАКЦИЮ ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

Еремин А.В.¹, Бурков М.В.^{1,2}, Любутин П.С.²

Научный руководитель: Панин С.В.^{1,2}, д.т.н., доцент

¹ Томский Политехнический Университет, 634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина 30

² Институт Физики Прочности и Материаловедения, 634021, Россия, г.Томск, пр. Академический 2/4

E-mail: eremin_av@bk.ru

Введение

Большое количество дефектов как производственного, так эксплуатационного происхождения в изделиях из композиционных материалов (КМ) обуславливает необходимость частого проведения контроля.

Значительный интерес представляют системы встроенного контроля – Structural Health Monitoring (SHM). Одним из подходов реализации концепции SHM является оценка состояния материала при помощи датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ) [1]. Однако, в литературе опубликованы результаты применения ДДИТ для исследования деформации и разрушения металлических сплавов.

В настоящей работе поставлена задача оценки возможности применения ДДИТ для анализа состояния циклически нагруженных КМ.

Материалы и методика исследования

Для циклических испытаний применяли образцы из КМ системы «углеродное волокно/эпоксидная матрица» (УКМ), с псевдоизотропной укладкой $[45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_{2S}$. Для защиты поверхности материала в укладку в качестве внешних слоев добавлена стеклоткань.

В качестве датчика деформаций выступала алюминиевая поликристаллическая фольга, которая наклеивалась на поверхность образца с помощью цианакрилатного клея с добавками пластификатора (Рис. 1). После наклейки фольги на образец, проводили его механическую ступенчатую шлифовку и полировку. Такой подход к подготовке ДДИТ позволяет получить зеркальную поверхность фольги с минимальным количеством дефектов.

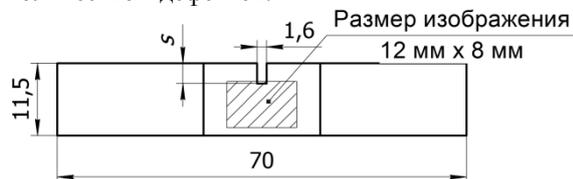


Рис.1. Чертеж образца с наклеенным ДДИТ (размер S принимался 3,4 мм, 4,5 мм, 5,6 мм)

Поверхность фольги освещалась двумя источниками: галогеновый студийный осветитель и точечный светодиодный источник (LED). Галогеновый осветитель использовался для формирования общего фона изображения. LED располагали под углом $\sim 10^\circ$ к поверхности для увеличения контраста формирующихся деформационных складок. Такая схема освещения зеркальной фольги позволяет получить на

начальных этапах циклического нагружения темное однотонное изображение, далее по мере наработки формируется деформационный рельеф, на элементах которого происходит рассеянное отражение, и области со сформировавшимся рельефом выглядят более светлыми.

Подготовленные образцы с ДДИТ испытывали по схеме одноосного циклического растяжения с асимметрией цикла $R = 0,1$ на сервогидравлической испытательной машине UTM Biss-00-201. В качестве видеодатчика использовали цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 550D с оптическим трактом микроскопа МБС-9. Размер получаемых изображений $12 \times 8 \text{ мм}^2$ (5184×3456 пикселей).

Чувствительность фольги к изменению НДС исследовали, варьируя размер бокового надпила. При этом величина верхней нагрузки в цикле подбиралась таким образом, чтобы усталостное разрушение происходило при одинаковом значении наработки.

Для анализа получаемых серий изображений ДДИТ рассчитывали следующие информативные признаки: среднеквадратичная ошибка MSE [2], Энтропия H [3] и фрактальная размерность ФР [4]. Для расчета выбирались две области – верхняя часть и центральная, показанные на рис. 2.



Рис. 2. Расположение расчетных областей

Результаты экспериментов

После проведения экспериментов получены три серии изображений фольг. Параметры циклических испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры циклических испытаний.

№	Наработка до разрушения, циклов	Частота нагружения, Гц	P_{\max} , кН	P_{\min} , кН
1	$50 \cdot 10^3$	10	11,1	1,1
2	$27 \cdot 10^3$	10	9	0,9
3	$48 \cdot 10^3$	10	7	0,7

Рассмотрим результаты расчетов трех информативных признаков, представленные в виде графиков на рисунках 3,4,5. Видно, что в процессе циклического нагружения изменение информативных признаков носит трехстадийный характер: на 1-ой их значения практически не меняются, на 2-ой наблюдается быстрый рост, на 3-й значения информативных признаков умеренно растут или остаются примерно постоянными.

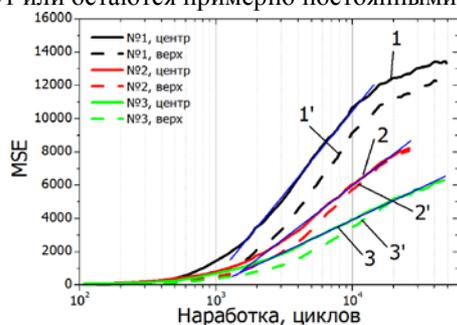


Рис. 3. Зависимость значений MSE от величины наработки

Анализ изменения значений MSE позволяет выделить следующие закономерности:

1. На графиках MSE (рис. 3) положение точки начала 1-й стадии не зависит от размера надпила;
2. Точка окончания 2-й стадии смещается в направлении возрастания количества циклов с ростом размера надпила;
3. Абсолютное значение MSE тем выше, чем меньше размер надпила;
4. Наклон 2-й стадии падает с ростом глубины надпила, что говорит о меньшей скорости накопления рельефа ДДИТ.

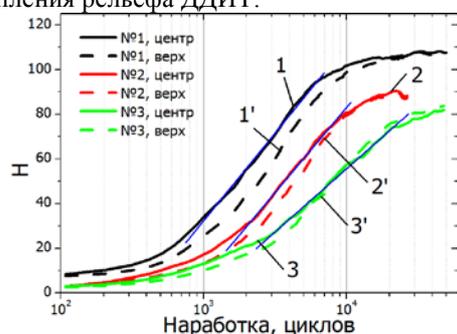


Рис.4. Зависимость значений H от величины наработки

Анализ изменения значений H позволяет выделить следующие закономерности:

1. У графиков энтропии на 1-й стадии рост более значительный, чем у MSE , что говорит о большей чувствительности к начальному этапу накопления рельефа;
2. Точка начала 2-й стадии смещается вправо, по сравнению с MSE ;
3. Абсолютные значения энтропии двух расчетных областей являются практически одинаковыми, при этом они снижаются с увеличением размера надпила.

Основные изменения значений ΦP (рис. 5) происходят на участке от начала нагружения до 10^3 - $3 \cdot 10^3$ циклов, где все три графика демонстрируют

быстрый рост. На дальнейший участок (от $3 \cdot 10^3$ циклов и до разрушения), который представляет наибольший интерес с точки зрения возможности использования для диагностики состояния материалов, остается лишь небольшой диапазон изменения ΦP (участок после наработки 5 тыс. циклов до разрушения)

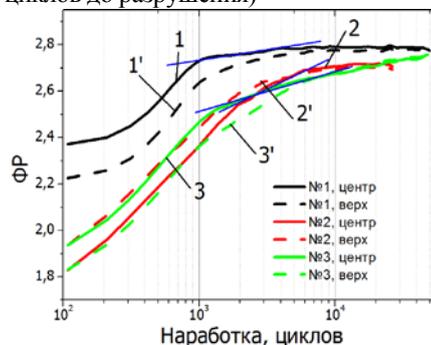


Рис. 5. Зависимость значений ΦP от величины наработки

Заключение

В работе исследовано влияние НДС на формирование рельефа ДДИТ при циклических испытаниях композиционных материалов. Разработаны многоступенчатая система подготовки датчиков-фольг, а также оригинальная схема освещения, которая совместно с хорошо подготовленной поверхностью фольг позволяет повысить надежность получаемых результатов. Анализ методов расчета информативных параметров по изображениям поверхности ДДИТ позволяет говорить о пригодности MSE для интегральной оценки поведения материала, информационной энтропии для оценки поведения материала на начальных этапах разрушения, при этом расчет ΦP при данной схеме нагружения использовать не рекомендуется в связи с низким диапазоном чувствительности, а также зависимостью получаемых результатов от начального состояния фольги.

Список литературы:

1. Змызгова Т.Р. Экспериментальная методика регистрирования и оценки накопленного усталостного повреждения в материале нефтегазового трубопроводного оборудования с помощью датчиков деформации интегрального типа // Экспозиция. Нефть. Газ. — 2012. — Т. 25, № 7. — С. 14-19.
2. M. Kudelka Jr. Image Quality Assessment // WDS'12 Proceedings of Contributed Papers — 2012. — Part I — P. 94-99.
3. Annick Lesne Shannon entropy: a rigorous mathematical notion at the crossroads between probability, information theory, dynamical systems and statistical physics – Math. Struct. in Comp. Science, 2011. – 43 p.
4. Jaggi S., Quattrochi D.A., Lam N.S.-N. Implementation and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote-sensing data // Computers and Geosciences — 1983. — V. 19, № 6. — P. 745-767.