

УДК: 6-620.192.63

**ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В УГЛЕПЛАСТИКЕ
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК**

**MEASUREMENT OF STRAINS IN CARBON REINFORCED PLASTIC
AT ELEVATED TEMPERATURES USING FIBER BRAGG GRATINGS**

По представлению чл.-корр. РАРАН А.Ф. Шаклеина

В.А. Анискович¹, О.Н. Будадин¹, Ю.Г. Кутюрин¹, Е.Б. Маркелов²

¹АО «ЦНИИСМ», ²РАРАН

V.A. Aniskovich, O.N. Budadin, Yu.G. Kutyurin, E.B. Markelov

В статье приведены результаты экспериментов по измерению деформаций с использованием Брэгговских решеток на оптическом волокне (ВБР) в образце из углепластика. Установлено, что использование нескольких ВБР с различной чувствительностью к температуре или деформации позволяет компенсировать температурный дрейф. Приведены количественные результаты измерений с использованием ВБР без анализа метрологических характеристик.

Ключевые слова: изделия из углепластика, деформация, решётка Брэгга, волоконно-оптические датчики, температурная компенсация.

The paper presents experimental results of measuring strains in a carbon-reinforced polymer composite sample using fiber-optic Bragg gratings (FBGs). It is established that the use of several FBGs with different sensitivity to temperature or strain allows the temperature drift to be compensated. The quantitative results of measurements using FBGs without the analysis of metrological characteristics are presented.

Keywords: carbon-reinforced polymer composite products, strain, Bragg grating, fiber-optic sensors, temperature compensation.

Перспективность использования в технике изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) сегодня не вызывает никаких сомнений. В авиационной, космической, автомобильной и ряде других отраслей промышленности всё большую часть элементов конструкций изготавливают из углепластиков, специфическое по сравнению с металлами поведение которых в процессе эксплуатации требует новых подходов к контролю напряжённо-деформированного состояния. Одним из перспективных путей перехода на качественно новый уровень безопасности и надёжности изделий авиационной и ракет-

но-космической техники является разработка и применение инкорпорированных в ПКМ систем контроля за его напряжённо-деформированным состоянием (НДС). В настоящее время в этом направлении проводится ряд работ по созданию информационных систем с датчиками на основе оптических волокон, обладающих высокими метрологическими характеристиками, надёжностью, стабильностью, малыми габаритами, оптимальной совместимостью с электронными системами обработки информации, невосприимчивостью к электрическим и электромагнитным помехам. Одним из типов волоконно-оптиче-

ских датчиков (ВОД), наиболее часто используемых при мониторинге НДС композиционных материалов, является сенсорная система на основе волоконных Брэгговских решёток (ВБР) [1]. Следует отметить высокую устойчивость ВБР к переменным динамическим нагрузкам. Так в [2] сообщается о сохранении работоспособности ВБР после полумиллиона циклов нагружения при деформации в 1 %.

ВБР достаточно чувствительны к изменениям температуры, которым подвержены конструкции из углепластика в процессе эксплуатации [3, 4], поэтому актуальной является задача компенсации температурного дрейфа ВБР для правильной оценки НДС.

В работе [5] показано, что в диапазоне температур до 300 °С наблюдается линейная зависимость смещения длины волны ВБР от температуры, а чувствительность к изменению температуры составляет 11,2 pm/°С, что подтверждается другими авторами. В этой же работе предлагается, как один из вариантов, компенсация температурного дрейфа путём использования двух ВБР с разным спектральным откликом на изменение температуры или деформации.

Основной задачей работы являлась оценка возможности использования волоконно-оптических датчиков на основе Брэгговских решёток в качестве средства измерения деформации в типовых углепластиковых образцах при повышенных температурах.

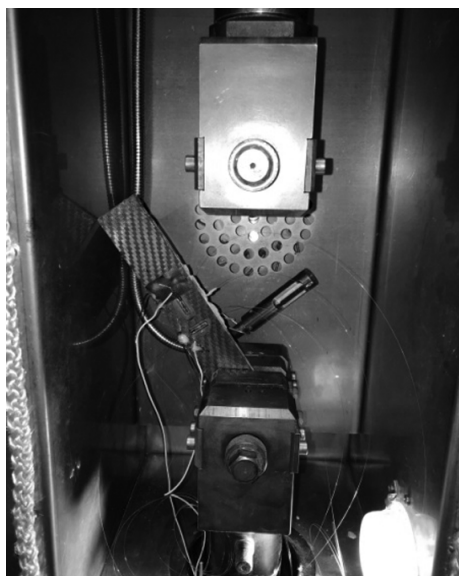


Рис. 1. Образец в термокриокамере стенда УТС 110М-100 1-У

Испытания проводились на образце углепластика размерами ~ 200×35×5 мм. На образец были наклеены две ВБР: одна в продольном, другая — в поперечном направлении образца. ВБР для контроля температуры закреплялась таким образом, чтобы отсутствовала жёсткая связь между ею и образцом. На наружной поверхности образца также были закреплены (наклеены) два тензорезистора типа FLA-10-11, на основе тонких пленок TML, сопротивлением 120 Ом. Внутрь образца, по середине толщины, были инкорпорированы две решётки ВБР, ориентированных одна в продольном, другая — в поперечном направлениях, и одна решётка для измерения температуры. ВБР для измерения температуры была расположена в стальной трубке Ø 0,2 мм и закреплялась одним концом оптоволоконна таким образом, чтобы не происходило влияния деформации на её показания. Процесс внедрения ВБР внутрь образца здесь не рассматривается, он представляет отдельный интерес и с некоторыми его специфическими особенностями можно ознакомиться в литературе [6, 7].

Образец был размещён в термокриокамере испытательного стенда для климатических и механических испытаний УТС 110М-100 1-У (рис. 1). В качестве измерительного блока использовался интеррогатор NTi155-160-ST (рис. 2).

Работа проводилась в два этапа.

На первом этапе образец был закреплён в термокамере одним концом, противоположный конец был свободен (рис. 1). Нагрев образца производился ступенями от комнатной температуры 23 °С с остановками при выходе на «плато» 40–60–80–100–120–140 °С. Результаты замеров изменения длины волны ВБР в процессе



Рис. 2. Интеррогатор NTi155-160-ST

нагрева приведены на рис. 3, 4. Здесь и далее на всех графиках, где осью абсцисс является время, приведена «сквозная» шкала.

На рис. 4 видно, что датчик температуры, установленный на поверхности изделия, измеряет температуру воздушных потоков в камере в силу отсутствия механической связи с образцом. Датчик температуры, встроенный в образец, не испытывает остаточных напряжений, что может служить подтверждением отсутствия его механической связи с образцом. При этом чувствительность датчиков заметно различается.

Второй этап работы заключался в том, что образец подвергался растяжению после ступенчатого нагрева образца до температуры 40–60–80–100–120–140 °С. Скорость нагружения

образца составляла 0,2 кН/с. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

Показания датчиков деформации в ходе второй части эксперимента корректировались с учётом температурного коэффициента, вычисленного по результатам первой части эксперимента (нагрев образца без приложения нагрузки).

Из рис. 5 видно, что показания ВБР в целом следуют общим зависимостям, за исключением встроенных датчиков деформации, которые при высоких температурах (120–140 °С) испытывают отжиг (снижение длины волны при постоянной температуре), в связи с тем, что перед началом эксперимента данные решетки не были отожжены; также зависимости датчиков деформации показывают остаточное сжатие после отжига,

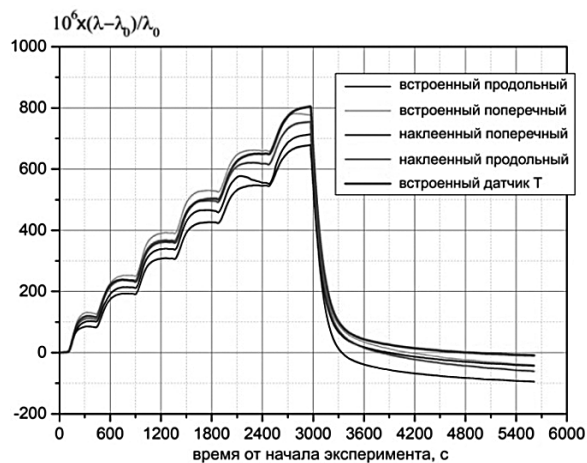


Рис. 3. Сопоставление показаний датчиков деформации и встроенного датчика температуры

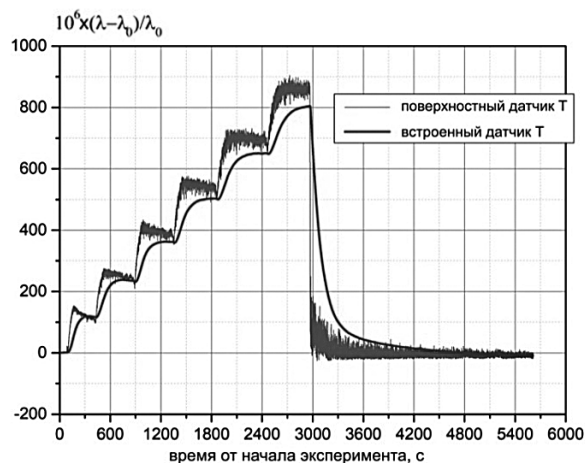


Рис. 4. Сопоставление показаний встроенного и поверхностного датчиков температуры

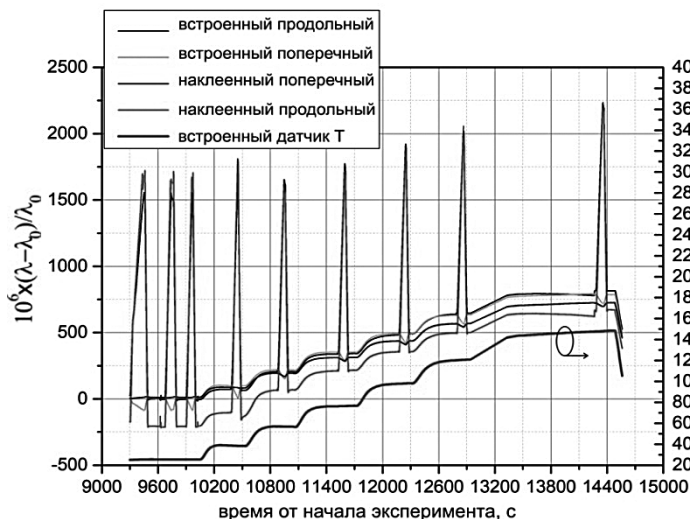


Рис. 5. График изменения длины волны ВБР в процессе нагружения при различных температурах

что, вероятно, связано с отжигом остаточных деформаций образца.

На рис. 6 показан фрагмент графика в увеличенном масштабе, который наглядно иллюстрирует разницу чувствительности ВБР и равномерность чувствительности по температуре. Видно, что изменение показаний датчиков происходит в значительной мере синхронно, т.е. образец прогревается равномерно.

Из полученных первичных показаний был вычтен тренд температурной зависимости, после чего с учетом коэффициента чувствительности $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 0,78\varepsilon [1]$ (что при резонансной длине волны ВБР ~ 1550 нм хорошо соответствует коэффициенту чувствительности $1,2$ пм/млн⁻¹) было вычислено значение деформации. Результаты вычислений представлены на рис. 7. В целом можно сказать, что циклы нагружения существенно отличались для образца при температуре

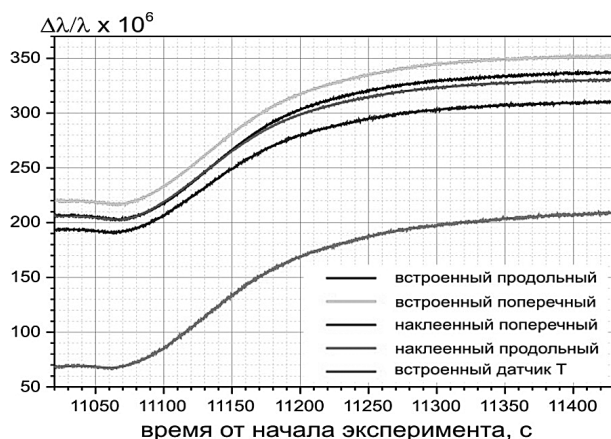


Рис. 6. Иллюстрация переходных процессов при нагреве образца

до 40 °С и выше 60 °С (особенно для датчиков, установленных на поверхность образца на клей), что, скорее всего, указывает на выравнивание образца в оснастке при несколько повышенной температуре. Данные для датчиков, измеряющих продольную деформацию, при температурах свыше 60 °С отличаются на величину — несколько процентов, что может быть связано, в том числе с небольшой погрешностью укладки датчика (не точной ориентации относительно продольной оси образца); данные с датчиков, измеряющих поперечную деформацию, отличаются более чем в 2 раза, что, по-видимому, свидетельствует о недостаточно хорошей восприимчивости клея к малым деформациям, связанным с боковым сужением образца при растяжении.

Небольшие отклонения от нуля в начале каждой зависимости связаны с погрешностью вычитания температурного дрейфа. В целом, уровень максимальной деформации образца ~ 2000 млн⁻¹ (0,2 %) соответствует оценке упругой деформации образца (например, при поперечном сечении $s = 1,4$ см² и модуле Юнга продольного растяжения 70 ГПа образец при приложении усилия $F = 20$ кН должен растягиваться на $e = 100 \% \cdot (F/Es) = 0,204$ %.

При проведении экспериментов также было зафиксировано неоднородное расширение спектра ВБР при увеличении нагрузки в процессе нагружения образца. На рис. 8 показан характер изменения огибающей спектра ВБР в процессе нагружения при комнатной температуре 23 °С. При нагрузке 20 кН центральный пик спектра для ВБР, наклеенной на наружную поверхность, не только сместился, но и расширился почти в

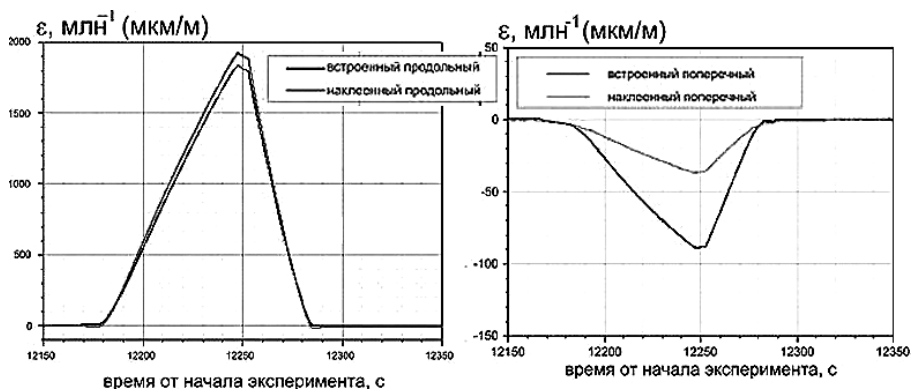


Рис. 7. Вычисленные значения показаний датчиков деформации в ходе седьмого цикла нагружения (при температуре 100 °С)

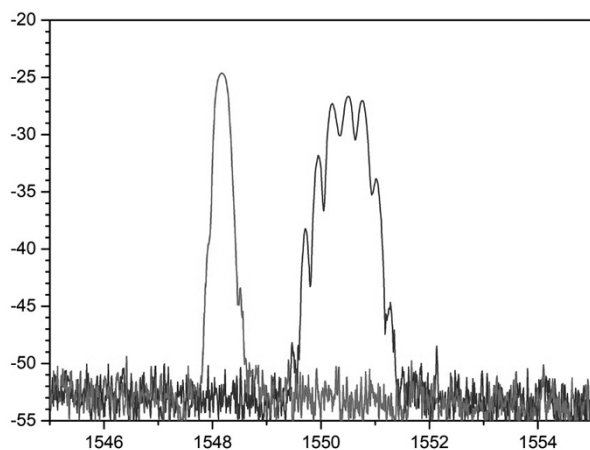


Рис. 8. Расширение спектра ВБР при увеличении нагрузки

2,5 раза. При этом наблюдалось частичное «расщепление» огибающей спектра. При повышении температуры при одной и той же нагрузке величина расширения уменьшалась. В описанном эксперименте зависимость величины расширения от температуры и величины нагрузки детально не рассматривалась.

Таким образом, в процессе проведения работы получены следующие результаты:

1. Установлено, что компенсация температурного дрейфа при измерении деформаций при повышенных температурах может быть осуществлена одним из двух способов: использованием ВБР, имеющих различную чувствительность к деформациям и температуре, либо использованием дополнительного датчика температуры на основе аналогичной ВБР;

2. Для получения стабильных и воспроизводимых результатов измерения требуется предварительная «тренировка» ВБР в воздушной среде (так называемый «отжиг»), которая сводится к выдержке ВБР при температуре, соответствующей верхнему пределу измерения, в течение 1,5–2 часов.

3. Точность результатов измерения может быть повышена при размещении ВБР внутри материала испытуемого объекта, при этом ВБР должна быть предварительно напряжена нагрузкой на растяжение порядка 0,02–0,08 % от верхнего предела измерения. Начальной точ-

кой отсчёта при проведении измерений при этом следует считать величину резонансной длины волны ВБР, измеренную при нормальных условиях после размещения ВБР в испытуемом объекте.

Литература

1. Гнусин П.И., Васильев С.А., Медведков О.И., Греков М.В., Дианов Е.М., Гуляев И.Н., Сиваков Д.В. Использование волоконных решеток в качестве чувствительных элементов в композиционных материалах // Фотон-экспресс. 2009. № 6 (78). С. 90–91.

2. Claire Davis, Silvia Tejedor, Ivan Grabovac, James Kopczyk and Travis Nuyens. High-Strain Fiber Gratings for Structural Fatigue Testing of Military Aircraft // Photonic Sensors. 2012. Vol. 2. № 3. Pp. 215–224.

3. Клюев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. и др. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. — Москва: Спектр. 2017. 199 с.

4. Анискович В.А., Будадин О.Н., Заикина Н.Л., Кутюрин В.Ю., Муханова Т.А., Разин А.Ф., Соловей А.В., Водопьянов В.А. Измерение деформаций с использованием волоконно-оптических датчиков в процессе прочностных испытаний анизотропных конструкций из композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 44–49.

5. Щевелев А.С., Кикот В.В., Удалов А.Ю. Информационно-измерительная система мониторинга изделий космической техники // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Том 3. Выпуск 2. С. 60–65.

6. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путём внедрения в него волоконных брэгговских решеток // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 2. С. 54–58.

7. Федотов М.Ю., Гончаров В.А., Шиенок А.М. Полимерные композиты с интегрированными электрическими сенсорами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 4. С. 25–31.