

Научная статья

УДК 681.5.08

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177612>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ

Михаил Михайлович Богатырев

Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Жуковский, Московская область, Россия
bogatyrevmm@gmail.com

Аннотация. Для обеспечения авиационного сообщения между регионами и сообщения с трудно-доступными для наземного транспорта населенными пунктами проектируется самолет местных воздушных линий, в котором система управления безопасностью полетов предусматривает применение встроенной технической диагностики и дистанционной передачи данных о нагруженности основных силовых элементов планера самолета. Традиционно для измерения деформаций конструкций применяют тензорезисторы и измерительные мосты на их основе, однако в ряде случаев представляется более перспективным решением применение волоконно-оптических датчиков (ВОД) на брэгговских решетках, особенно для конструкций из композитных материалов, широко применяемых в современных самолетах. Для регистрации нагруженности основных силовых элементов планера самолета в статье рассмотрены результаты исследований на эталонной установке воспроизведения деформации УГТ-1 ЦАГИ образцов ВОД деформаций, основанных на волоконных брэгговских решетках, и сравнения их погрешностей с погрешностями традиционных тензомостов. Результаты исследований продемонстрировали, что волоконно-оптические датчики могут быть применены в системе мониторинга нагруженности и усталостной повреждаемости основных силовых элементов планера самолета.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, волоконно-оптические датчики деформации, измерение деформации, мониторинг напряженно-деформированного состояния, деформация авиационных конструкций, метрологические характеристики волоконно-оптических датчиков, воспроизведение деформации

Для цитирования: Богатырев М.М. Исследование деформации планера самолета с помощью волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 109–119. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177612>

Original article

STUDYING AN AIRCRAFT AIRFRAME DEFORMATION WITH BRAGG LATTICE BASED FIBER-OPTIC SENSORS

Mikhail M. Bogatyrev

Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia
bogatyrevmm@gmail.com

© Богатырев М.М., 2023

Abstract

Development of the regional airline aircraft is being planned with the view for the uninterrupted communication ensuring between regions and remote settlements frequently inaccessible for the ground transport. This aircraft is intended to be equipped with the flight safety monitoring system, including the built-in technical diagnostics and remote data transmission to control loading on its basic structural elements. While traditional methods of structural deformation measuring include strain gauges and Winston bridges, application of optical sensors with Bragg lattice becomes promising alternative especially for the composite materials widespread in both modern and future aircraft.

This article presents the results of research conducted on an experimental setup replicating deformations measured by the Fiber Bragg lattice-based sensors, which allows performing comparative analysis of their accuracy with traditional strain gauges. Complex studies of metrological characteristics of the measurement system based on the fiber Bragg lattices were performed with the specialized testing rig to assess the feasibility of electric strain gauges replacement by the fiber Bragg lattices. The article recounts in detail the results of these tests.

Metrological characteristics of the FOS&SSG-01 (Belgium) and TechnicaFBG (USA) optical sensors together with two strain gauges were studied within the framework of this study. The key parameters including sensitivity, the sensitivity non-linearity and creep under normal conditions were estimated. The obtained results reveal that the deformation measurement error based on the fiber Bragg lattice exceeds both deformation reproduction error by the testing rig (0.12%) and measurement error obtained with the strain gauges (0.12%). The error observed in the strain gauge channels (0.12%) is explained by the deformation reproduction error as well.

Besides, the studies of the fiber Bragg lattices revealed that the relative error within the range of 350 – 1000 microstrain was of 0.25% for the FOS&SSG-01 sensors (Belgium), and 0.35% for the TechnicaFBG sensors (USA). It is remarkable that higher deformation measurement errors were recorded at the start of the deformation setting range of (0 - 350) microstrain, probably associated with the specifics of the sensor fixing on the beam of pure bending.

The results of the presented study provide a confident basis for the justified application of the fiber optical sensors in the cases when the split-hair accuracy is not obligatory. Permanent advancement of the Bragg lattice based fiber sensors installing promises further enhancing of their application for monitoring the aircraft basic structural elements loading, proposing practical and effective solutions in the aircraft building industry.

Keywords: fiber Bragg lattice, fiber-optic strain sensors, strain measurement, stress-strain state monitoring, aircraft structures deformation, fiber-optic sensors metrological characteristics, strain reproduction

For citation: Bogatyrev M.M. Studying an Aircraft Airframe Deformation with Bragg Lattice Based Fiber-Optic Sensors. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 109-119. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177612>

Введение

Широкое применение современных материалов, в том числе и композитных, в конструкции планера самолета повышает требования к безопасности их эксплуатации. В частности, важным вопросом является измерение деформации в конструкции планера, в которую на стадии формования композитного материала можно включить ВОД для непрерывного измерения, что в конечном итоге позволит обеспечить эксплуатацию планера воздушного судна по фактическому техническому состоянию.

С развитием регистрирующей аппаратуры и удешевлением технологии технология измерения деформации с помощью ВОД стала более доступной. Данная технология в настоящий момент применяется в самых различных областях от строительства зданий, контроля качества производства до космических аппаратов [1–7]. Лидеры авиационной отрасли широко используют волоконно-оптические датчики (ВОД) как при проведении натурных испытаний ЛА и их моделей, так и в каче-

стве встроенных систем мониторинга напряженно-деформированного состояния при эксплуатации. Наиболее часто в этих задачах применяются ВОД на основе решеток Брэгга, так как технология является наиболее изученной, доступной и являющейся аналогом применения тензорезисторов по своей сути, что упрощает перенос методик измерения и обработки данных с классической тензометрии на волоконно-оптическую [8–13].

Технология волоконных брэгговских решеток (ВБР) привлекает создателей систем мониторинга нагруженности авиационных конструкций, в том числе из композиционных материалов [14–16], а также исследователей деформированного состояния объектов нефтегазового комплекса [17] своими очевидными преимуществами:

– ВБР могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду их абсолютной взрывобезопасности, что очень важно при измерениях, например, внутри кессона крыла, где, как известно, находится топливо;

– ВБР и соединительные компоненты изготавливаются из диэлектрических материалов, благодаря чему исключается прохождение через них электрического тока и отсутствует проблема дугообразования и искрения;

– электромагнитные поля не влияют на результат измерения;

– отсутствуют побочные электромагнитные излучения;

– не возникают перекрестные помехи каналов;

– отсутствуют проблемы, связанные с контурами заземления, с напряжениями и смещениями в местах соединения разнородных проводников;

– у ВБР высокая стойкость к вредным воздействиям среды;

– оптическое волокно более тонкое и легкое по сравнению с электрическим кабелем;

– простое мультиплексирование сигналов;

– обеспечивается высокий уровень синхронизации измерений.

Однако при таком большом количестве преимуществ ВБР перед классической тензометрией, которая, как известно, лидирует в измерении напряженно-деформированного состояния конструкций, в том числе конструкций измерительных приборов [18–20], существуют и недостатки, которые до сих пор заставляют многих специалистов сомневаться в целесообразности перехода с одной технологии на другую. К ним стоит отнести:

– все еще высокую стоимость измерительного оборудования и цену «одной точки»;

– необходимость записи ВБР в волокне на специализированных установках, что сопряжено с логистическими трудностями и затратами времени;

– хрупкость оптического волокна при монтаже и необходимость его защиты, особенно в местах перехода от одного типа защитного покрытия к другому.

Также, в отличие от электрических проводов, соединение оптических волокон в случае обрыва либо произвольного соединения «по месту» требует наличия определенного оборудования и квалифицированного специалиста. Поскольку качественное сварное соединение требует некоторого пространства вокруг и удобной обстановки, производить его непосредственно на объекте не всегда возможно. Это сильно усложняет работы по монтажу ВБР на объекте, в отличие от тензорезисторов, где отдельно монтируется тензорезистор и с помощью паяльника подпаиваются провода.

Но все перечисленные недостатки не являются критическими. Стоимость оборудования неуклонно снижается в связи с увеличением количества производителей и активным развитием технологии. Также растет число компаний, которые занимаются записью ВБР в волокне, находятся они

во многих городах России и работают достаточно оперативно.

Что касается защиты волокна перед монтажом, здесь важную роль играет приобретенный опыт и наработка технологий монтажной защиты, со временем проблема становится незначительной и случайных повреждений все меньше.

Сварных соединений можно избежать при правильном проектировании геометрии оптоволокон. Расстояния между решетками, различными типами защитных покрытий, длина участков и количество соединителей – все это необходимо предусмотреть на этапе формирования технического задания с учетом условий монтажа измерительной системы на объекте испытаний. Сделать это без соответствующего опыта также не просто, однако он накапливается по мере увеличения количества выполненных работ.

Итак, перечисленные трудности преодолимы, и с ними стоит бороться ради приобретения очевидных преимуществ. Но остается главный вопрос: какова точность таких измерений, какова стабильность с изменением параметров окружающей среды и с течением времени? Смогут ли ВБР полноценно заменить тензорезисторы, особенно при решении задач, где используются сотни их, а иногда и тысячи?

Стоит отметить, что при решении разных задач в авиационной промышленности предъявляются разные требования по точности измерений. Например, в случае с аэродинамическими тензосенсорами требования максимальные и погрешность измерительного канала должна быть гарантирована на уровне не ниже 0,01%. А в задачах натуральных испытаний на прочность достаточной точностью можно считать и единицы процентов погрешности.

Для определения целесообразности замены электрических тензорезисторов волоконно-оптическими ВБР были проведены исследования метрологических характеристик измерительной системы на основе ВБР на специализированных стендах. Результаты исследований приведены в данной статье.

Описание экспериментальной установки

Исследования проводились с использованием установки воспроизведения деформации УГТ-1 ЦАГИ. Установка УГТ-1 ЦАГИ предназначена для воспроизведения деформации при определении метрологических характеристик датчиков деформации в нормальных условиях. Установка состоит из системы нагружения, системы измерения прогиба и упругого элемента постоянного прямоугольного сечения (балка чистого изгиба). Система нагружения позволяет задавать постоянный момент на

рабочем участке балки в двух направлениях. Внешний вид установки воспроизведения и измерения деформации УГТ-1 ЦАГИ представлен на рис. 1, а структурная схема представлена на рис. 2. В исследованиях использовались волоконно-оптические датчики деформации FOS&SSG-01 (Бельгия) и TechnicaFBG (США).

Измерителем прогиба в установке является электронно-цифровой индикатор TESSA Digi с рабочим диапазоном 0–5 мм с погрешностью 2 мкм. Значение деформации на рабочей области балки вычисляется по значению прогиба балки. В соответствии с паспортами данными погрешность воспроизведения деформации балки не более 0,16%.

Для испытаний на балке чистого изгиба наклеивались тензорезисторы и датчик на основе ВБР



Рис. 1. Внешний вид установки

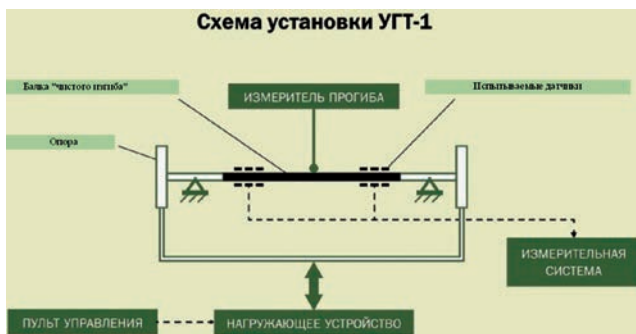


Рис. 2. Структурная схема установки

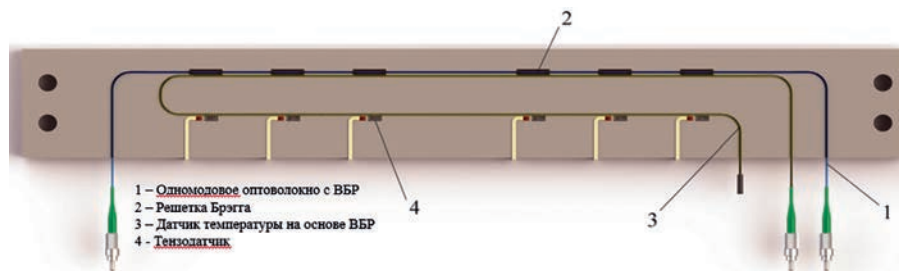


Рис. 3. Схема расположения датчиков

с обеих сторон симметрично. Рабочая область, то есть зона равной деформации балки, составляла 350 мм. Электрически тензорезисторы были соединены так, чтобы образовывались два полных тензомоста. Один из мостов был подключен к тензоусилителю HBM DMP-41 (основная приведенная погрешность 0,0025%, несущая частота 225 Гц) по шестипроводной схеме, второй мост был подключен к тензометрической аппаратуре М7095 (основная приведенная погрешность 0,01%, знакопеременное питание), разработанной в ЦАГИ. ВБР, установленные на балке, подключались к анализатору спектра (интеррогатор) Astro x327. Использовались ВБР двух производителей: TechnicaFBG (США) и FOS&SSG (Бельгия). Расположение датчиков показано на рис. 3. Монтаж датчиков на балку производился в соответствии с технологией наклейки тензорезисторов.

При проведении исследований соблюдались условия для окружающей среды, представленные в табл. 1.

Перед проведением исследования в соответствии с требованиями эксплуатационной документации все элементы были выдержаны до начала измерений в помещении, где проводились испытания, в рабочем положении в течение 24 ч.

В связи с тем что ВОД на момент проведения исследований не имели разработанной и утвержденной в РФ методики поверки, основой для составления методики проведения испытаний стал ГОСТ 21616-91 Тензорезисторы. Общие техниче-

Таблица 1

Условия окружающей среды

Наименование характеристики	Значение
Температура окружающей среды, °С	23 ⁺² ₋₃
Допускаемое изменение температуры в эксперименте, °С/ч	±2
Относительная влажность воздуха, %	30–60
Атмосферное давление	96–10 ⁴ кПа (730–790 мм рт.ст.)

ские условия. В соответствии с ГОСТ 21616-91 были выполнены следующие операции:

- внешний осмотр;
- опробование;
- определение метрологических характеристик.

Метрологические характеристики включали:

а) функции преобразования:

- среднее значение чувствительности при нормальных условиях;
- среднеквадратичное отклонение (СКО) чувствительности при нормальных условиях;
- нелинейность функции преобразования при нормальных условиях;

б) ползучесть при нормальных условиях:

- среднее значение ползучести;
- СКО ползучести.

Исследование характеристик ВОД

Определение параметров функции преобразования включало оценку чувствительности, СКО чувствительности, нелинейности чувствительности и ползучести.

Перед проведением рабочих нагружений, связанных с определением чувствительности и СКО чувствительности при нормальных условиях, в соответствии с ГОСТ 21616-91 были проведены три

тренировочных цикла нагружения с деформацией в каждом цикле $\epsilon = (1100 \pm 50) \text{ млн}^{-1}$. Значения созданных в балке тренировочных деформаций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения созданных в балке тренировочных деформаций

№ тренировочного цикла	Первая сторона балки, млн^{-1}	Вторая сторона балки, млн^{-1}
1	0; +1100; -1100	0; -1100; +1100
2	+1100; -1100	-1100; +1100
3	+1100; -1100	-1100; +1100

После выполнения трех тренировочных нагружений было выполнено одно рабочее нагружение (с измерением выходных сигналов). Последовательность воспроизведения деформаций в цикле рабочего нагружения: 0, 1000, 0, -1000, 0 млн^{-1} . Время, затрачиваемое на каждое нагружение и определение выходных сигналов балки, не превышало двух минут. Результаты, полученные при проведении операций по определению чувствительности, представлены в табл. 3.

По данным, представленным в табл. 3, определялись:

Таблица 3

Результаты операций по определению чувствительности

Опытные данные					
Индикатор	Деформация	Оптодатчик №1	Оптодатчик №2	Тензомост №1	Тензомост №2
мм	млн^{-1}	длина волны, пм	длина волны, пм	мкВ	мкВ
Рабочий цикл № 1					
-0,006	-3,131	-205	-243	4,541	-157,772
2,081	1085,938	-1307	-1342	-11273,203	5565,39
0,004	2,087	-216	-254	-54,598	-126,383
-1,527	-796,842	595	563	8208,327	-4314,46
0,008	4,174	-216	-252	-71,645	-118,404
Рабочий цикл № 2					
0,008	4,174	-216	-252	-71,645	-118,404
2,053	1071,327	-1285	-1323	-11114,821	5485,7
0,010	5,218	-215	-249	-8,143	-108,766
-1,558	-813,018	618	573	8374,483	-4398,32
-0,005	-2,348	-203	-243	5,063	-156,615
Рабочий цикл № 3					
0,005	2,609	-203	-243	5,063	-156,615
2,051	1070,283	-1295	-1329	-11104,84	5480,55
0,007	3,652	-220	-256	-66,106	-119,483
-1,544	-805,713	602	561	8300,631	-4360,58
-0,017	-8,871	-203	-242	71,788	-190,533

– чувствительность каждого измерительного канала по формуле

$$\bar{K} = \frac{|\xi(+\varepsilon_{\max})| + |\xi(-\varepsilon_{\max})|}{|\varepsilon_{\max}| + |-\varepsilon_{\max}|},$$

где $\xi(+\varepsilon_{\max})$ и $\xi(-\varepsilon_{\max})$ – показания измерительных каналов ВБР и тензомостов при значениях деформации соответственно $+\varepsilon_{\max}$ и $-\varepsilon_{\max}$;

$+\varepsilon_{\max}$ и $-\varepsilon_{\max}$ – соответственно максимальная деформация балки при ее выпуклом и вогнутом изгибе;

– СКО, рассчитываемое по формуле

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2},$$

где i – количество рабочих циклов.

Полученные значения чувствительности и СКО чувствительности представлены в табл. 4.

По результатам исследований были определены коэффициенты чувствительности по четырем каналам измерения деформации и вычислены их СКО.

Алгоритм задания деформаций при определении нелинейности чувствительности при нормальных условиях представляет собой также три тренировочных цикла и последовательность рабочих нагружений:

- 0; 250; 0; -250; 0 млн⁻¹;
- 0; 500; 0; -500; 0 млн⁻¹;
- 0; 750; 0; -750; 0 млн⁻¹;
- 0; 1000; 0; -1000; 0 млн⁻¹.

По полученным значениям выходных сигналов вычислялись средние значения выходного сигнала $\xi(\varepsilon_j)$ для каждой ступени деформации. Нелинейность функции преобразования рассчитывалась по формуле

$$\bar{\gamma} = \max \left| \frac{\xi(\varepsilon_j) - \bar{K}\varepsilon_j}{\bar{K}\varepsilon_j} \cdot 100 \right|,$$

где \bar{K} – среднее значение чувствительности;
 $j = 1, 2, \dots, m$ – номер ступени деформации;
 m – число ступеней.

Результаты, полученные при проведении операций по определению нелинейности чувствительности при нормальных условиях, представлены в табл. 5.

Полученные значения нелинейности чувствительности представлены в табл. 6.

На рис. 4 показана динамика изменения $\bar{\gamma}$ по всем четырем измерительным каналам.

На рис. 5 и 6 показано изменение нелинейности чувствительности для волоконно-оптических датчиков (см. рис. 5) и тензомостов (см. рис. 6).

В итоге проведенных исследований установлено, что относительная погрешность полученных значений деформации с тензомостов не превышает погрешности задания деформации (0,12%) на всем диапазоне задания (0–1000 млн⁻¹). DJL деформации FOS&SSG-01 (Бельгия) и TechnicaFBG (США) в диапазоне деформации (350 – 1000 млн⁻¹)

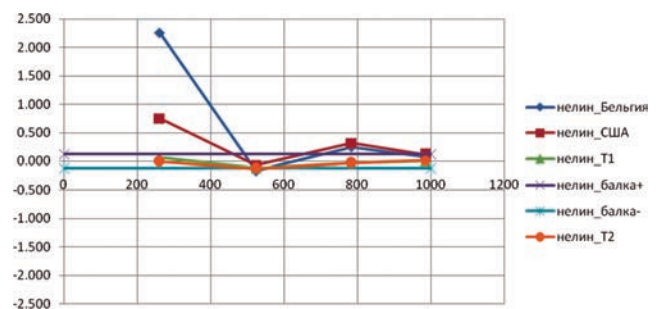


Рис. 4. Изменение чувствительности

Таблица 4

Значения чувствительности и СКО чувствительности

Название датчика	Волоконно-оптический датчик (Бельгия)		Волоконно-оптический датчик (США)		Тензомост № 1 (М7095)		Тензомост № 2 (НВМ)	
	Чувствительность	СКО чувствительности	Чувствительность	СКО чувствительности	Чувствительность	СКО чувствительности	Чувствительность	СКО чувствительности
Условное обозначение	$\bar{K}_{\text{опто1}}$	$S_{\bar{K}_{\text{опто1}}}$	$\bar{K}_{\text{опто2}}$	$S_{\bar{K}_{\text{опто2}}}$	\bar{K}_{T1}	$S_{\bar{K}_{T1}}$	\bar{K}_{T2}	$S_{\bar{K}_{T2}}$
Единица измерения	$\frac{\text{нм}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{нм}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{нм}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{нм}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{мкВ}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{мкВ}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{мкВ}}{\text{млн}^{-1}}$	$\frac{\text{мкВ}}{\text{млн}^{-1}}$
Значение	-1,0104	0,0007	-1,008	0,003	-10,344	0,002	5,246	0,001

Таблица 5

Результаты, полученные при по определении нелинейности чувствительности

Экспериментальные данные					
Индикатор	Деформация	Волоконно-оптический датчик (Бельгия)	Волоконно-оптический датчик (США)	Тензомост № 1 (М7095)	Тензомост № 2 (НВМ)
мм	млн ⁻¹	длина волны, пм	длина волны, пм	мкВ	мкВ
0; 250; 0; -250; 0 млн ⁻¹					
-0,0035	-1,826	-218	-259	16,297	-161,359
0,5065	264,309	-497	-533	-2743,497	1237,57
-0,013	-6,784	-215	-255	67,017	-187,327
-0,495	-258,308	43	-2	2666,046	-1504,04
0,002	1,044	-223	-263	-15,867	-146,131
0; 500; 0; -500; 0 млн ⁻¹					
0,01	5,218	-230	-270	-62,117	-121,569
0,998	520,791	-748	-787	-5395,93	2583,88
-0,014	-7,306	-215	-254	65,238	-186,137
-1,01	-527,053	309	269	5431,304	-2906,3
-0,006	-3,131	-219	-259	26,545	-167,578
0; 750; 0; -750; 0 млн млн ⁻¹					
-0,006	-3,131	-219	-259	26,545	-167,578
1,5	782,753	-1011	-1051	-8111,403	3961,56
-0,0015	-0,783	-221	-261	-8,006	-149,386
-0,508	-786,927	579	537	8122,145	-4271,04
0,006	3,131	-224	-264	-44,186	-132,22
0; 1000; 0; -1000; 0 млн ⁻¹					
-0,009	-4,697	-214	-256	34,292	-171,957
1,994	1040,539	-1276	-1314	-10796,208	5323,79
-0,006	-3,131	-216	-256	20,351	-163,957
-1,783	-930,432	717	676	9594,167	-5017,62
0,0085	4,436	-224	-264	-66,708	-121,018

Таблица 6

Значения нелинейности чувствительности

Степень	Нелинейность чувствительности			
	Волоконно-оптический датчик $\bar{\gamma}_{\text{Бельгия}}$, %	Волоконно-оптический датчик $\bar{\gamma}_{\text{США}}$, %	Тензомост №1 $\bar{\gamma}_{\text{T1}}$, %	Тензомост №2 $\bar{\gamma}_{\text{T2}}$, %
1-я степень (± 250 млн ⁻¹)	2,259	0,749	0,060	-0,006
2-я степень (± 500 млн ⁻¹)	-0,168	-0,069	-0,114	-0,128
3-я степень (± 750 млн ⁻¹)	0,249	0,316	-0,026	-0,028
4-я степень (± 1000 млн ⁻¹)	0,073	0,116	0,006	0,012

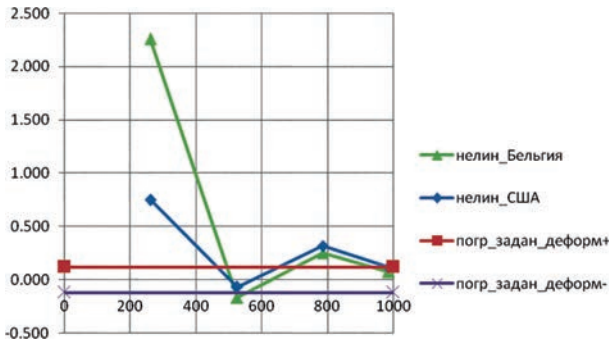


Рис. 5. Изменение чувствительности для волоконно-оптических датчиков

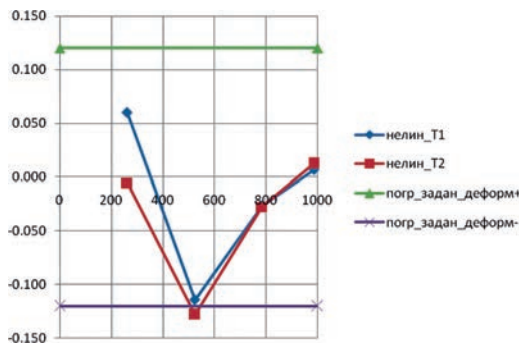


Рис. 6. Изменение чувствительности для тензомостов

показали относительную погрешность измерения, равную 0,25 и 0,32%, соответственно. В начальной стадии нагружения 350–1000млн⁻¹ их погрешность составила порядка 2,5% для FOS&SSG-01 (Бельгия) и 0,75% для TechnicaFBG (США). Предположительно, повышенное значение погрешности на начальном этапе нагружения связано с технологией наклейки ВОД деформации. Предположительно, не было выдержано корректное предварительное натяжение волокна, что сделать достаточно слож-

но, и для уменьшения погрешности на начальном этапе требуется усовершенствовать технологию наклейки ВОД.

При определении ползучести при нормальных условиях алгоритм нагружения состоял в следующем. Нагружение балки с датчиками от деформации $\epsilon = 0$ млн⁻¹ до $\epsilon = 1000$ млн⁻¹ за время не более 60 с. В течение последующего времени не более 60 с определяли начальные значения $\xi(0)$ выходных сигналов датчиков деформации. Затем значения выходных сигналов определили по истечении 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 мин.

Ползучесть $\Pi(\tau_j)$ в процентах за промежуток времени τ_j для каждого датчика рассчитывалась по формуле

$$\Pi(\tau_j) = \frac{\xi(\tau_j) - \xi(0)}{\xi(0)} \cdot 100.$$

Экспериментальные данные представлены в табл. 7, а результаты исследований – в табл. 8 и на рис. 7.

Анализируя полученные в ходе проведения эксперимента экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что ползучесть ВОД деформации и тензомостов различна. Выходной сигнал тен-

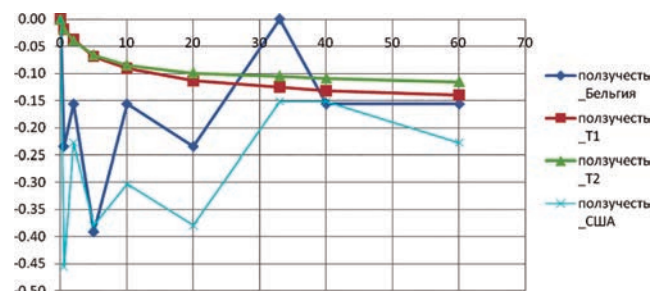


Рис. 7. График ползучести ВОД

Таблица 7

Экспериментальные данные

Время, мин	Волоконно-оптический датчик (Бельгия), нм	Волоконно-оптический датчик (США), нм	Тензомост.№ 1, мВ	Тензомост.№ 2, мВ
0	-1277	-1317	-10822,955	5339,17
0,5	-1274	-1311	-10820,896	5338,2
2	-1275	-1314	-10818,873	5337,08
5	-1272	-1312	-10815,521	5335,65
10	-1275	-1313	-10813,11	5334,66
20	-1274	-1312	-10810,627	5333,88
30	-1277	-1315	-10809,452	5333,56
40	-275	-1315	-10808,697	5333,36
50	-1275	-1314	-10808,283	5333,01
60	-1277	-1317	-10822,955	5339,17

Таблица 8

Результаты определения ползучести

Время, мин	Ползучесть волоконно-оптического датчика (Бельгия) $P_{\text{Бельгия}}(\tau_j), \%$	Ползучесть волоконно-оптического датчика (США) $P_{\text{США}}(\tau_j), \%$	Ползучесть $P_{T1}(\tau_j)$, тензомост № 1, %	Ползучесть $P_{T2}(\tau_j)$, тензомост № 2, %
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	-0,23	-0,46	-0,02	-0,02
2	-0,16	-0,23	-0,04	-0,04
5	-0,39	-0,38	-0,07	-0,07
10	-0,16	-0,30	-0,09	-0,08
20	-0,23	-0,38	-0,11	-0,10
30	0,00	-0,15	-0,12	-0,11
40	-0,16	-0,15	-0,13	-0,11
50	-0,16	-0,23	-0,14	-0,12
60	0,00	0,00	0,00	0,00

зомостовых датчиков деформации имеет плавный характер, функция изменения которого стремится к установившемуся значению. Графики ползучести показаний пары ВОД деформации сходны по виду, имеют существенно большую амплитуду и большую случайную составляющую.

Выводы

В ходе проведения исследований ВОД деформации FOS&SSG-01 (Бельгия) и TechnicaFBG (США) и двух тензомостов были получены такие характеристики, как чувствительность, нелинейность чувствительности и ползучесть при нормальных условиях. Полученные результаты показывают, что погрешность измерения деформации ВОД превышает как погрешность задания деформации (0,12%), так и погрешность измерения деформации с помощью тензомостов (0,12%). Кроме того, полученная погрешность тензометрических каналов (0,12%) обусловлена также погрешностью задания деформации на балке.

При проведении исследований ВОД деформации было установлено, что для значений деформаций в диапазоне (350–1000) млн^{-1} значения относительной погрешности составляют 0,25% для датчиков FOS&SSG-01 (Бельгия) и 0,32% TechnicaFBG (США). На начальном этапе задания деформации (0–350) млн^{-1} наблюдались большие значения погрешности измерения деформации, возможно связанные с особенностью наклейки датчиков на балку чистого изгиба.

По результатам проведенных исследований можно с уверенностью сказать, что применение волоконно-оптических датчиков целесообразно в задачах, в которых не требуется высочайшей точности измерения. Совершенствование технологии

монтажа ВОД позволит широко их применять в системе мониторинга нагруженности основных силовых элементов планера самолета.

Список источников

1. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. 2005. № 6(46). С. 128–140.
2. Карасик В.Е., Лазарев В.А., Неверова Н.А. Измерительное устройство контроля деформации и температуры на основе наноразмерных волоконно-оптических датчиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 58. С. 51–58.
3. Коннов К.А., Сложеникина Ю.И., Грибаев А.И. и др. Исследование и оптимизация процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1004–1010. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010
4. Новикова В.А., Варжель С.В., Дмитриев А.А. и др. Исследование спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом при воздействии давления, направленного перпендикулярно оси оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 751–757. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757
5. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В. и др. Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 4. С. 340–346. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-340-346
6. Стам А.М., Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И. и др. Запись волоконных решеток Брэгга с использованием ин-

- терферометра Тальбота и эксимерной КгF-лазерной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 5. С. 466–473. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
7. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В. и др. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 241–245. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245
 8. Серьезнов А.Н., Кузнецов А.Б., Лукьянов А.В. и др. Волоконно-оптическая система мониторинга состояния конструкции самолета, выполненного из композиционного материала // III Отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (05–06 июня 2018; Жуковский): Сборник статей. – Жуковский: Изд-во ЦАГИ, 2018. С. 588–598.
 9. Баутин А.А., Свирский Ю.А., Панков А.В. и др. Способы применения волоконно-оптических датчиков деформаций в системах мониторинга // Прикладная фотоника. 2018. Т. 5. № 4. С. 391–407.
 10. Белолов М.И., Белолов М.М., Семенов С.Л. и др. Разработка волоконно-оптических датчиков контроля технических характеристик и оценки работоспособности композитных узлов изделий авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 3(159). С. 45–53.
 11. Шипунов Г.С., Воронков А.А., Пеленев К.А. и др. Оценка точности показаний волоконно-оптических датчиков на основе решеток Брэгга при испытании лопатки спрямляющего аппарата из углепластика // Международные конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (01–05 октября 2018; Томск). Томск: Издательский дом ТГУ, 2018. С. 488. DOI: 10.17223/9785946217408/314
 12. Блокин-Мечталин Ю.К., Богатырев М.М., Зайцев М.Д. и др. Применение волоконнооптических систем измерения деформаций при испытаниях прочности планера самолета // III Отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (05–06 июня 2018; Жуковский): сборник статей. – Жуковский: Изд-во ЦАГИ, 2018. С. 554–563.
 13. Ларин А.А., Федотов М.Ю., Бухаров С.В. и др. Новые области применения систем волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4. № 4. С. 310–323.
 14. Chandler K., Ferguson S., Graver T. et al. On-line structural health and fire monitoring of a composite personal aircraft using an FBG sensing system // SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008. Vol. 6933. DOI: 10.1117/12.783125
 15. Schmidt H.-J., Schmidt-Brandecker B. Design Benefits in Aeronautics Resulting from Structural Health Monitoring. Encyclopedia of Structural Health Monitoring / Edited by Boller C., Chang F., and Fujino Y. - John Wiley & Sons, Ltd. 2009, pp. 1807-1813.
 16. Fernández-López A., Menendez J.M., Güemes A. Damage detection in a stiffened curved plate by measuring differential strains // 16th International Conference on Composite Materials (8-13 2007; International Conference Center, Kyoto, Japan), pp. 1-8.
 17. Исламов Р.Р., Александров Ю.В., Гуськов С.С. Определение продольных механических напряжений в трубопроводе на основании данных волоконно-оптических датчиков деформации // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 5. С. 45–50.
 18. Манвелян В.С. Шестикомпонентные вращающиеся тензометрические весы для испытания соосных винтов // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 53-64. DOI: 10.34759/vst-2020-1-53-64
 19. Петровев В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С., Куликов А.А., Зимогоров С.В. Исследование по разработке шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний рулевого винта вертолета // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 69–84. DOI: 10.34759/vst-2021-2-69-84
 20. Петровев В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С., Куликов А.А., Зимогоров С.В. Исследования по калибровке шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний винтов летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 48–61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

References

1. Garmash V.B., Egorov F.A., Kolomiets L.N. et al. *Foton-Ekspres*, 2005, no. 6(46), pp. 128-140.
2. Karasik V.E., Lazarev V.A., Neverova N.A. *Nauchno-tekhnikeskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2008, no. 58, pp. 51-58.
3. Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I., Gribaev A.I. et al. *Nauchno-tekhnikeskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1004-1010. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010
4. Novikova V.A., Varzhel' S.V., Dmitriev A.A. et al. *Nauchno-tekhnikeskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 751-757. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757

5. Mun'ko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 340-346. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-340-346
6. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 466-473. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
7. Mun'ko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V. et al. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 241-245. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245
8. Ser'eznov A.N., Kuznetsov A.B., Luk'yanov A.V. et al. *Materialy III Otrasevnoi konferentsii po izmeritel'noi tekhnike i metrologii dlya issledovani letatel'nykh apparatov (05–06 June 2018; Zhukovskii)*. Zhukovskii, TsAGI, 2018, pp. 588-598.
9. Bautin A.A., Svirskii Yu.A., Pankov A.V. et al. *Prikladnaya fotonika*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 391-407.
10. Belovolov M.I., Belovolov M.M., Semenov S.L. et al. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2020, no. 3(159), pp. 45-53.
11. Shipunov G.S., Voronkov A.A., Pelenev K.A. et al. *Materialy Mezhdunarodnykh konferentsii "Perspektivnye materialy s ierarkhicheskoi strukturoi dlya novykh tekhnologii i nadezhnykh konstruktsii" i "Khimiya nefiti i gaza" v ramkakh Mezhdunarodnogo simpoziuma "Ierarkhicheskie materialy: razrabotka i prilozheniya dlya novykh tekhnologii i nadezhnykh konstruktsii" (01–05 October 2018; Tomsk)*. Tomsk, Izdatel'skii Dom TGU, 2018, p. 488. DOI: 10.17223/9785946217408/314
12. Blokin-Mechtaln Yu.K., Bogatyrev M.M., Zaitsev M.D. et al. *Materialy III Otrasevnoi konferentsii po izmeritel'noi tekhnike i metrologii dlya issledovani letatel'nykh apparatov (05–06 June 2018; Zhukovskii)*. Zhukovskii, TsAGI, 2018, pp. 554-563
13. Larin A.A., Fedotov M.Yu., Bukharov S.V. et al. *Prikladnaya fotonika*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 310-323.
14. Chandler K., Ferguson S., Graver T. et al. On-line structural health and fire monitoring of a composite personal aircraft using an FBG sensing system. *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, vol. 6933. DOI: 10.1117/12.783125
15. Schmidt H.-J., Schmidt-Brandecker B. *Design Benefits in Aeronautics Resulting from Structural Health Monitoring. Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Edited by Boller C., Chang F., and Fujino Y. - John Wiley & Sons, Ltd. 2009, pp. 1807-1813.
16. Fernández-López A., Menendez J.M., Güemes A. Damage detection in a stiffened curved plate by measuring differential strains. *16th International Conference on Composite Materials (8-13 2007; International Conference Center, Kyoto, Japan)*, pp. 1-8.
17. Islamov R.R., Aleksandrov Yu.V., Gus'kov S.S. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2016, no. 5, pp. 45–50.
18. Manvelyan V.S. Six-component rotating strain-gauge balance for coaxial rotors testing. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 53-64. DOI: 10.34759/vst-2020-1-53-64
19. Petronevich V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S., Kulikov A.A., Zimogorov S.V. Study on six-component rotating strain-gauge balance development for helicopter tail rotor testing. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 69-84. DOI: 10.34759/vst-2021-2-69-84.
20. Petronevich V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S., Kulikov A.A., Zimogorov S.V. Studies on six-component rotating strain-gauge balance calibration for aircraft propellers testing. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 48-61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

Статья поступила в редакцию 22.08.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 31.10.2023.

The article was submitted on 22.08.2023; approved after reviewing on 16.10.2023; accepted for publication on 31.10.2023.