

УДК 620.1:621.311.001.57:51–74

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК (ОБОБЩАЮЩАЯ СТАТЬЯ)¹

© В. В. Махсидов, А. М. Шиенок, Д. В. Иошин, В. А. Резников²*Статья поступила 22 июля 2015 г.*

Волоконные чувствительные элементы на основе брэгговских решеток (ВБР) являются перспективной основой датчиков определения деформации в измерительных системах, в частности для встроенного контроля различных конструкций. Рассмотрена возможность их применения в структуре полимерного композиционного материала для элементов конструкций авиационного назначения. Принцип работы ВБР основан на изменении периода решетки — периодической структуры показателя преломления сердечника оптического волокна. Изменение периода может вызывать и термическое расширение (сжатие) оптоволокна. Поэтому для задач встроенного контроля важно понимать, с чем связана деформация оптоволокна в области расположения ВБР — с изменением приложенной к нему механической нагрузки или изменением температурного режима эксплуатации. В работе систематизированы предлагаемые подходы к учету изменения температуры при измерениях деформации с помощью ВБР и приведены результаты работ в этой области. Описаны возможные способы реализации каждого подхода, указаны точности измерения деформации и температуры, описана конструктивная схема чувствительного элемента.

Ключевые слова: волоконный сенсорный элемент; волоконная брэгговская решетка; деформация; полимерный композиционный материал; встроенный контроль; ВБР; ПКМ.

Длительная эксплуатация изделий авиационной техники требует периодической диагностики конструкции и оценки ее остаточного ресурса. Выполнение данных процедур предполагает приостановку эксплуатации авиатехники для ее осмотра, в том числе с применением дополнительного оборудования. В ряде случаев необходим внеплановый осмотр конструкции. Все это приводит не только к простою авиатехники, но и к вынужденным задержкам рейсов. Сократить время осмотра, а в перспективе уменьшить количество осмотров изделия можно с помощью системы встроенного контроля. Она позволит не только своевременно выявлять проблемные места конструкции и сокращать длительность их поиска, но и в будущем прогнозировать ее остаточный ресурс в реальном масштабе времени. Это особенно важно для изделий на основе полимерных композиционных материалов [1].

В настоящее время в качестве чувствительных элементов в системах встроенного контроля в основном используются пьезоэлектрические, акустические, тепловые, электромагнитные и особенно широко — электрические датчики (тензодатчики), закрепляемые в различных точках контролируемой конструкции [2]. Качество крепления датчиков, наличие высокого уровня шумов и вибрации во время полета, сильные электромагнитные поля и дополнительный вес делают

системы встроенного контроля крайне ненадежными. Поэтому вопрос о применении чувствительных элементов для контроля конструкции весьма актуален.

Одними из перспективных типов датчиков являются оптоволоконные, в частности на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) [3]. ВБР в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно. Благодаря своим преимуществам ВБР начинают все шире применяться для систем встроенного контроля в ряде отраслей промышленности, исследуется возможность их использования для изделий авиационной и космической техники [4]. Одним из ключевых параметров оценки состояния материала в процессе работы элемента конструкции является его деформация. ВБР могут быть интегрированы в структуру полимерного композиционного материала (ПКМ) при изготовлении детали.

Принцип работы ВБР основан на изменении ее периода, приводящем к смещению резонансной длины волны решетки [5]. Колебание температуры окружающей среды приводит к изменению размера оптоволокна (главным образом осевого), а следовательно, — периода ВБР. В результате без информации о температуре окружающей среды нельзя однозначно оценивать состояние материала и измерять его деформацию.

В данной работе систематизированы предлагаемые подходы к учету изменения температуры при из-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-03-12047 офи_м.

² Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), Москва, Россия;
e-mail: admin@viam.ru; mahksidov_vv@viam.ru

мерениях деформации с помощью ВБР и приведены полученные результаты в этой области. Способы учета изменения температуры предназначены для интегрируемых в структуру ПКМ чувствительных элементов на основе ВБР с целью оценки состояния материала по их отклику. Для каждого способа описаны возможные схемы реализации, указана точность измерения деформации и температуры и представлена конструктивная схема датчика. Кроме того, рассмотрено кварцевое оптическое волокно, а под волоконной брэгговской решеткой подразумевается однородная или аподизированная ВБР. Под температурной компенсацией (термокомпенсацией) понимается определение деформации материала с учетом изменения его температуры — по отклику чувствительного элемента на основе ВБР. Кроме указанных случаев, под соединением оптоволоконна имеется в виду его сварка плавлением, а под деформацией — относительная осевая составляющая деформации материала при его растяжении или осевая деформация оптоволоконна в области с ВБР. Практически во всех рассмотренных работах термокомпенсация осуществляется в диапазоне температур от комнатных (20 °C) до 100 – 200 °C, а диапазон измерений деформации — до нескольких тысяч мк (1000 мк = 0,1 %).

Методы температурной компенсации результатов измерений деформации с помощью ВБР. В общем случае деформация оптоволоконна в области с ВБР складывается из деформации от приложенной механической нагрузки и деформации, вызванной термическим расширением или сжатием оптического волокна. В свою очередь, термическое расширение или сжатие оптического волокна приводит к изменению периода решетки. Математические модели, которые позволяют связать деформацию оптического волокна в области с ВБР с изменением ее резонансной длины волны с учетом термического расширения или сжатия оптоволоконна, приведены в работах [6 – 8]. В них отмечена необходимость учета колебаний температуры в процессе измерений деформации с помощью ВБР. В публикации [7] приведена одна из простых математических моделей взаимосвязи резонансной длины волны ВБР с ее деформацией:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon_z + \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где λ — резонансная длина волны ВБР; $\Delta\lambda$ — изменение резонансной длины волны ВБР; ε_z — линейная деформация вдоль оси z ; n_{eff} — показатель преломления применяемого кварцевого стекла; p_{11} , p_{12} — коэффициенты Поккельса упруго оптического тензора; ν — коэффициент Пуассона оптоволоконна; α — коэффициент линейного термического расширения кварцевого оптоволоконна; ΔT — изменение температуры оптоволоконна в области с ВБР.

В этом же исследовании проведен анализ влияния изменения температуры на деформацию ВБР в процессе измерения. Рассмотрено оптоволоконно с ВБР, испытывающее только радиальную деформацию (торцы оптоволоконна зафиксированы). Падение температуры оптоволоконна на 100 К при использовании формулы (1) может привести к неверному выводу о том, что в области с ВБР оно испытывает осевое растяжение, равное 188 мк, в то время как на самом деле происходит только его радиальная деформация. Данный пример показывает, что на практике необходимо учитывать изменение температуры в виде соответствующей составляющей деформации оптоволоконна и понимать, какую на самом деле деформацию испытывает материал.

Предлагаемые методы учета температурной составляющей деформации оптоволоконна можно разделить на несколько групп, в основе которых лежат следующие принципы:

- 1) применение дополнительной изолированной ВБР или другого типа оптоволоконного сенсора [9 – 15];
- 2) различный отклик ВБР по деформации при одинаковом отклике по температуре [16 – 26];
- 3) различный отклик ВБР по температуре при одинаковом отклике по деформации [27 – 46];
- 4) наложенные друг на друга ВБР [47 – 55];
- 5) применение дополнительной обработки спектра ВБР [11, 56 – 62].

Применение дополнительной изолированной ВБР или другого типа оптоволоконного сенсора. В первой группе термокомпенсация результата измерения деформации с помощью ВБР осуществляется за счет применения дополнительной ВБР, которая изолирована от внешнего механического воздействия и измеряет только температуру, или за счет использования дополнительного оптоволоконного сенсора другого типа. Самым простым способом изоляции ВБР от механического воздействия является помещение ее в капилляр. Изолированная ВБР должна располагаться на достаточно близком расстоянии от ВБР, измеряющей деформацию, для учета колебаний температуры. Данный способ использовали в работах [9 – 12]. Наибольшая точность при измерении деформации была получена в работах [9, 10] — относительные погрешности измерения деформации и температуры находились на уровне 3 – 5 %. Важно отметить попытку [11] одновременного измерения не только температуры и осевой деформации ВБР, но и ее поперечной составляющей. При этом авторы использовали одномодовое оптоволоконно SMF-28; погрешность измерения по осевой деформации составила 14 %, а по поперечной — 40 %, по температуре — не сообщается. В указанных работах авторы использовали кварцевые, карбидокремниевые и стальные капилляры с наружным диаметром примерно от 0,6 до 3 мм.

В работе [13] описан датчик на основе ВБР и внешнего Фабри – Перо интерферометра (fibre bragg grating/extrinsic Fabry – Pérot interferometric sensor (FBG/EFPI)), деформацию измеряли с точностью $\pm 0,6$ мк с учетом колебаний температуры. Авторы работы [14] применяли ВБР в оптоволокне SMF-28, соединенном с волокном, легированным эрбием. При этом участок волокна, легированного эрбием, должен находиться рядом с ВБР. Точность измерения деформации данным методом составила $\pm 18,2$ мк, а температуры — $\pm 0,7$ °C. Другие исследователи [15] применяли двулучепреломляющий волоконный отражатель, соединенный с длиннопериодной ВБР, записанной в волоконном фотонном кристалле. Точность измерения деформации составила $\pm 8,9$ мк, а температуры — $\pm 0,32$ °C.

Различный отклик ВБР по деформации при одинаковом отклике по температуре. Вторая группа методов термокомпенсации основана на расположении одной или двух ВБР в едином или различном оптоволокне, находящемся в одном и том же поле температуры, но в разных полях деформации. При этом данную группу можно разделить на следующие подгруппы: 1) две ВБР находятся в симметричном или отличающемся по направлению действия поле деформации; 2) используется чувствительность ВБР к неоднородностям деформации вдоль ее оси; 3) применяют комбинацию первых двух способов.

В первой подгруппе авторы работ [16 – 18] располагали ВБР по разные стороны от металлической пластины/балки (диафрагмы), к консоли (сторонам) которой прикладывали поперечную (осевую) силу. Таким образом, ВБР испытывали одинаковые по значению, но противоположные по знаку деформации, при одинаковой температуре. Постоянство температуры обеспечивалось металлической пластиной (балкой) с небольшой толщиной. При таком способе термокомпенсации [16] удалось получить точность измерения деформации ± 9 мк.

Во второй подгруппе использовали воздействие приложенной к материалу с ВБР осевой деформации, которая распределялась неравномерно, для локального изменения ее периода [19 – 22]. В результате из однородной ВБР под действием неравномерно распределенных деформаций вдоль ее оси получали чирпированную брэгговскую решетку (chirped FBG). Применяли [19] однородную ВБР, интегрированную в образец клиновидной формы, изготовленный на основе полимера, для создания линейного градиента деформации вдоль ее длины. Чувствительность такого датчика составила $2,62 \cdot 10^{-3}$ нм/Н по силе и $0,108$ нм/°C по температуре. Использовали [20] две последовательно расположенные в едином оптоволокне ВБР, одна из которых записывалась поверх вытянутого участка оптоволокна, а другая — либо в не вытянутой его части, либо на переходной части. В первом случае точность измерения деформации составила $\pm 9,27$ мк,

а температуры — $\pm 2,08$ °C, а во втором — $\pm 7,56$ мк и $\pm 1,34$ °C соответственно. Другие авторы [21] получали чирпированную ВБР в конусообразном оптоволокне в результате вытяжки волокна с записанной однородной ВБР. Здесь точность измерения деформации составила $\pm 4,4$ мк. Применяли [22] также чирпированную ВБР, на которую частично надет капилляр.

Необходимо отметить работы [23 – 26], в которых описаны комбинации методов первой и второй подгрупп (третья подгруппа). В исследовании [23] в качестве датчика использовали две последовательно расположенные ВБР в едином оптоволокне, к участку одной из которых приклеено такое же волокно. Соединенные волокна, располагающиеся в материале, при действии осевой силы в месте соединения удлиняются меньше из-за большего размера сечения. При этом расстояние между ВБР составляло около 100 мм. Точность измерения деформации таким методом составила $\pm 13,48$ мк, а температуры — $\pm 2,44$ °C. Авторы работы [24] предложили способ термокомпенсации на основе двух последовательных ВБР, записанных по концам оптоволокна разного диаметра и соединенных вместе. Точность данного решения по деформации составила ± 17 мк, по температуре — ± 1 °C. Использовали также [25] датчик на основе короткопериодной ВБР, наложенной на длиннопериодную. Такая комбинация ВБР разделена на две равные части, одна из которых закреплена в отверстии и залита полимерным материалом, а другая прикреплена свободным концом к подвижной части. Такой датчик имеет чувствительность по давлению $9,65 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹ и по температуре $(2,90 - 3,82) \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹. В исследовании [26] использовали датчик на основе двух последовательно записанных ВБР в двулучепреломляющем оптоволокне, закрепленном на разных основаниях, соединенных между собой: на угле- и стеклопластике. Анализ поляризованного спектра позволил измерять деформацию с погрешностью $\pm 0,02$ %.

Различный отклик ВБР по температуре при одинаковом отклике по деформации. Термокомпенсация в третьей группе основывается на различной чувствительности двух ВБР к температуре при нахождении в одинаковом поле деформации. Данный принцип можно реализовать путем: соединения двух оптических волокон с различным содержанием легирующих добавок в его сердечнике; записи ВБР на концах оптоволокна либо поверх места соединения оптических волокон; записи в единое оптоволокно ВБР различного типа; совмещения указанных способов (гибридные).

Так, авторы работ [27 – 29] использовали датчик на основе двух соединенных волокон с различным содержанием легирующих добавок в его сердечнике и записанных рядом с местом соединения ВБР. При этом вначале изготавливали ВБР в различных волокнах, а потом соединяли их сваркой. Точность измерения деформации и температуры в работах [27, 28] примерно одинаковая: $\pm 22,1$ мк и $\pm 2,4$ °C; $\pm 18,4$ мк и

$\pm 2,2$ °C. Отмечается, что отраженный от ВБР сигнал может быть недостаточной интенсивности или искажен за счет близко расположенного места сварки волокон. В работе [29] показано, что коэффициент температурной чувствительности для ВБР в полимерном волокне будет на порядок больше, чем в кварцевом, и предложено использовать сочетание таких волокон, для объединения которых необходимо применять специальный соединитель. ВБР записывали также [30 – 32] поверх места соединения оптических волокон. Наибольшая точность измерений деформации и температуры составила [32] $\pm 8,5$ мк и $\pm 1,6$ °C.

Другой способ [33 – 35] использует две записанные в единое оптоволокно ВБР различного типа (I и IIА, IА и IIА). Для случая сочетания ВБР типов I и IIА [33] точность измерения деформации и температуры составила $\pm 8,49$ мк и $\pm 1,5$ °C.

В этой группе методов возможно измерять температуру и деформацию другими способами. В работе [36] авторы использовали крученную ВБР (tilted FBG) и за счет различной чувствительности мод в сердечнике и оболочке к температуре получили точность измерения деформации ± 11 мк и температуры ± 1 °C. В патенте [37] за счет сочетания одной длиннопериодной и двух короткопериодных ВБР с различной резонансной длиной волны получена точность измерения деформации ± 9 мк и температуры ± 2 °C. При этом одна из двух короткопериодных ВБР выполняет функцию отражателя сигнала, проходящего через длиннопериодную ВБР. В аналогичном методе [38] получена точность измерения деформации ± 11 мк и температуры ± 2 °C.

Вместе с тем применяются и гибридные способы, сочетающие в себе не только брэгговскую решетку, но и другие типы чувствительных элементов [39 – 41]. Сочетание в едином оптоволокне двух ВБР, разделенных полостью в виде алюминиевой трубки, позволяет измерять деформацию и температуру с точностью ± 30 мк и $\pm 0,4$ °C [39], а сочетание длиннопериодной ВБР и внешнего микроволоконно-оптического интерференционного чувствительного элемента Фабри – Перо (long-period fibre grating and a micro extrinsic fiber-optic interferometric Fabry – Péro — (LPFG/MEFPI) — с точностью $\pm 0,5$ мк и $\pm 0,02$ °C при разрешении оптического спектрального анализатора 2,5 пм [40].

Возможность использования встраиваемых волоконных эталонов позволяет получить точность измерения деформации ± 80 мк и температуры ± 10 °C [42]. Предложено [43] использовать для термокомпенсации ВБР, записанную в специальное несимметричное оптоволокно; точность измерения составила ± 14 мк и ± 2 °C.

Авторы работ [44, 45] записывали ВБР в микроструктурированные оптические волокна; точность измерения [44] — $\pm 10,7$ мк и $\pm 1,5$ °C.

Предложен датчик [46], состоящий из двух ВБР в различных оптических волокнах: ВБР в одномодо-

вом оптоволокне обвита двулучепреломляющим волокном также с ВБР; точность измерения — ± 46 мк и $\pm 3,1$ °C. Такое решение позволяет одновременно измерять, кроме осевой деформации и температуры, еще и поперечную нагрузку с точностью $\pm 0,01$ Н/мм.

Наложённые друг на друга ВБР. Решения четвертой группы методов основаны на записи ВБР одной поверх другой. Данную группу можно разделить на три подгруппы: короткопериодная ВБР записана в одну из периодических составляющих длиннопериодной ВБР (superstructure FBG) [47, 48]; короткопериодная ВБР наложена на длиннопериодную (superimposed FBG) [49 – 51]; две наложенные друг на друга короткопериодных ВБР [52 – 54].

В первой подгруппе конструкция, предложенная в работе [47], позволила получить чувствительность датчика по давлению — $3 \cdot 10^{-2}$ МПа, по температуре — $0,02$ нм/°C. Как отмечено выше, в данном случае ВБР работает только на растяжение – сжатие. Проведенный анализ такого чувствительного элемента [7] показал, что данная конструкция при измерениях осевой и хотя бы одной из поперечных составляющих деформаций будет приводить к значительным погрешностям.

Во второй подгруппе комбинации короткопериодной и длиннопериодной ВБР дала возможность получить более точные значения деформации и температуры; ± 5 мк, $\pm 0,4$ °C [49] и $3,71$ мк, $\pm 0,55$ °C [50].

Важно, что измерение деформации при вышеуказанных конструктивных решениях на основе короткопериодной ВБР, наложенной на длиннопериодную, должно происходить на расстоянии между началом и концом длиннопериодной ВБР, т.е. на достаточно протяженном участке.

В третьей подгруппе наибольшая точность измерения деформации и температуры получена в работе [52] — ± 10 мк и ± 1 °C. Необходимо отметить, что авторы публикации [54] использовали двулучепреломляющее оптоволокно и одновременно измеряли не только температуру и осевую деформацию, но и одну из поперечных составляющих деформации; точность измерения — ± 11 мк (осевая), ± 74 мк (поперечная), ± 12 °C.

Необходимо отметить исследование [55], в котором с помощью ВБР и наложенной крученной ВБР (superimpose tilted FBG) получена точность измерения деформации ± 12 мк и температуры ± 3 °C.

Применение дополнительной обработки спектра ВБР. Пятая группа способов разделения деформации и температуры основана на обработке получаемого спектра от ВБР в результате отражения или прохождения света через чувствительный элемент. Здесь используются разделение деформации и температуры по анализу 1-й и 2-й гармоник отраженного и проходящего спектра и анализ поляризованного спектра от ВБР.

В работах [56, 57] авторы использовали метод разделения деформации и температуры, основан-

ный на анализе 1-й и 2-й гармоники отраженного спектра от ВБР. При разрешении спектроанализатора $1,2 \cdot 10^{-12}$ м точность измерения деформации и температуры составила ± 21 мк и $\pm 2,1$ °C, а при разрешении $1,2 \cdot 10^{-14}$ м — ± 1 мк и $\pm 0,1$ °C. В статье [57] говорится о чувствительности по деформации $\pm 14,27$ мк/мм и по температуре $\pm 1,56$ °C/мм. Авторы работы [58] применили анализ 1-й гармоники отраженного и проходящего спектра и получили чувствительность измерения по деформации $0,5 - 0,9$ мк/мм и по температуре $6,0 - 10,9$ °C/мм.

Использовали [59] метод разделения деформации и температуры, основанный на чувствительности поляризационно зависимых потерь ВБР. Точность измерения деформации составила $\pm 0,006$ %, а температуры — ± 6 °C.

Следует отметить публикацию [60], в которой разделение деформации и температуры осуществляли за счет анализа спектра от двух chirпированных ВБР. Получена точность измерения деформации ± 20 мк при чувствительности по температуре $38,12$ °C/мм. По мнению авторов, преимуществом такого метода является возможность применения большого количества ВБР в составе единого оптоволокну. В перспективе предполагается повысить точность измерения деформации до ± 1 мк.

В статье [61] предложено разделять деформацию и температуру на основе дифференциальной модуляции ослабления сигнала от длиннопериодной ВБР; точность измерения — ± 58 мк и ± 1 °C.

Предложен [62] способ разделения деформации и температуры на основе различной чувствительности по температуре и деформации широкополосного и узкополосного пиков потерь в спектре ВБР, представляющей собой наложенную короткопериодную на длиннопериодную ВБР (superstructure FBG); точность измерения — ± 20 мк и $\pm 1,2$ °C.

Помимо вышеуказанных, имеются и другие методы разделения деформации и температуры. В работе [63] предложен относительно простой способ разделения деформации и температуры, основанный на знании полной осевой деформации и коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) основания оптоволокну, к которому он приклеен. Чувствительный элемент состоит из двух последовательно записанных ВБР в едином оптоволокну, одна из которых закрепляется на подложке с известным КЛТР. Сообщается о чувствительности по температуре в $13,3$ ppm/°C.

В статье [64] рассматривается чувствительный элемент на основе последовательно соединенного одномодового и многомодового оптоволокну. При этом ВБР записана в одномодовом оптоволокну. Чувствительный элемент образуется за счет сочетания ВБР и соединения с многомодовым волокну, которые взаимодействуют как интерферометр Mach-Zehnder. Точность измерения — $\pm 9,21$ мк и $\pm 0,26$ °C.

Авторы работы [65] использовали специально разработанное несимметричное двулучепреломляющее оптическое волокно, в которое записали ВБР. Точность измерения при использовании такого оптоволокну — ± 14 мк и ± 2 °C (при разрешении спектроанализатора $0,5$ пм).

В заключение следует отметить, что понимание составляющих деформации материала будет в значительной степени способствовать правильной оценке его состояния и повышению точности определения повреждаемости, что поможет определить остаточный ресурс конструкции. А это в перспективе позволит перейти от назначенного ресурса к ресурсу по фактическому состоянию.

Для создания одной из подсистем встроенного контроля конструкции на основе интегрируемых ВБР в ПКМ необходимо решить одну из главных проблем — измерение деформации. Это требует уточнения таких вопросов, как обеспечение минимального снижения механических свойств ПКМ в результате внедрения оптоволокну и его ввода-вывода из элемента конструкции, выбора математического аппарата для пересчета регистрируемой физической величины в деформацию сенсора, уточнение его конструкции, реализация термокомпенсации и стабильности показаний, а также перехода от деформации сенсора к деформации ПКМ.

Следует отметить, что наилучшим результатом из приведенных работ является точность определения деформации $\pm(1 - 20)$ мк и температуры $\pm(0,1 - 5)$ °C. Сочетание ВБР с другим типом оптоволокну сенсора позволяет значительно повысить точность их измерения до $0,5$ мк и $0,02$ °C.

Метод термокомпенсации, основанный на применении дополнительной изолированной ВБР или другого типа оптоволокну сенсора, прост в реализации, требует лишь изготовления составного чувствительного элемента и привязки деформации и температуры к конкретной ВБР. Главным его недостатком являются значительные структурные искажения ПКМ, возникающие как вокруг капилляра, так и вокруг области близко расположенных ВБР. Кроме того, количество контролируемых точек в материале будет ограничено возможностями укладки достаточного количества оптических волокну в структуру материала, возможностями оборудования и чувствительностью к сигналу от ВБР, так как предполагается, что второй конец ВБР герметично закрыт. Такой способ термокомпенсации подходит для точечных датчиков при их небольшом количестве в системе.

Методы термокомпенсации, базирующиеся на различном отклике ВБР по деформации при одинаковом отклике по температуре, также отличаются простотой реализации и возможностью интеграции большого количества ВБР в единое оптоволокну. Одним из важных недостатков такого метода является то, что далеко не во всех элементах конструкций (а тем более

в случае интеграции в ПКМ) поле деформации будет симметричным. Кроме того, в большинстве предложенных способов измерения для последующего расчета деформации и температуры происходят с разнесенных в пространстве ВБР, что не гарантирует одинаковой температуры в данных точках.

Термокомпенсация, использующая различный отклик ВБР по температуре при одинаковом отклике по деформации, обладает преимуществами по минимальным структурным искажениям, образуемым в результате интеграции оптоволокон в ПКМ, и возможности интеграции значительного количества ВБР в одно (составное) оптоволокно. Важно отметить, что в отличие от предыдущих методов здесь данные для последующего расчета температуры берутся из той же области, что и для деформации. Существенным недостатком такого метода в части технологии изготовления ПКМ и оптоволокон является большое количество его соединений, что может приводить к излому в соответствующих местах в процессе транспортировки, укладки в структуру будущего ПКМ и отверждения.

К достоинствам метода, применяемого наложением ВБР друг на друга, следует отнести: минимум искажений структуры ПКМ при интеграции оптоволокон с такими составными чувствительными элементами в структуру материала; получение данных о температуре и деформации практически с одной и той же области материала; возможность интеграции достаточно большого количества ВБР в единое оптоволокно; технологичность при изготовлении составных чувствительных элементов. Кроме того, ряд способов позволяет сделать составной чувствительный элемент более компактным, чем в рассмотренных выше решениях.

В методе термокомпенсации, основанном на дополнительной обработке спектра ВБР, преимуществами являются простота и технологичность при изготовлении оптоволокон с чувствительными элементами и его укладка в структуру материала. К недостаткам можно отнести необходимость наличия высокоточного и высокопроизводительного оборудования.

Способы термокомпенсации возможно сгруппировать и по другому признаку.

Авторы статьи выражают благодарность канд. физ.-мат. наук С. А. Васильеву и О. И. Медведкову (НЦВО РАН) за помощь при анализе погрешностей измерений.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Kablov E. N.** Shestoi tekhnologicheskii uklad [Sixth technological epoch] / Nauka Zhizn'. 2010. N 4. P. 2 – 7 [in Russian].
2. **Gulyaev I. N., Gunyaev G. M., Raskutin A. E.** Polimernye kompozitsionnye materialy s finktsiyami adaptatsii i diagnostiki sostoyaniya [Polymer Composite Materials with the Adaptation Functions and State Diagnostics] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. NS. P. 242 – 253 [in Russian].

3. **Vasiliev S. A., Medvedkov I. O., Korolev I. G., Bojkov A. S., Kurkov A. S., Dianov E. M.** Volokonnye reshetki pokazatelya prelomleniya i ikh primeneniye [Fibre gratings and their applications] / Kvant. Élektro-nika. 2005. Vol. 35. N 12. P. 1085 – 1103 [in Russian].
4. **Takeda N.** Fiber optic sensor-based SHM technologies for aerospace applications in Japan / Proc. SPIE 6933 "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems." 2008. (doi: 10.1117/12.776838).
5. **Hill K. O., Meltz G.** Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview / J. Lightwave Technol. 1997. Vol. 15. P. 1263 – 1276.
6. **Lawrence C. M., Nelson D. V., Udd E., Bennett T.** A Fiber Optic Sensor for Transverse Strain Measurement / Experimental Mechanics. 1999. Vol. 39. N 3. P. 202 – 209.
7. **Leduc D., Lecieux Y., Morvan P.-A., Lupi C.** Architecture of optical fiber sensor for the simultaneous measurement of axial and radial strains / Smart Mater. Struct. 2013. Vol. 22. P. 9. (doi: 10.1088/0964-1726/22/7/075002).
8. **Kollar L. P., Van Steenkiste R. J.** Calculation of the stresses and strains in embedded fiber optic sensors / J. Compos. Mater. 1998. Vol. 32. P. 1647 – 1679.
9. **Montanini R., D'Acquisto L.** Simultaneous measurement of temperature and strain in glass fiber/epoxy composites by embedded fiber optic sensors: I. Cure monitoring / Smart Mater. Struct. 2007. N 16. P. 1718 – 1726.
10. **Song M. H., Lee S. B., Choi S. S., Lee B. H.** Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube / Opt. Fiber Tech. 1997. N 3. P. 194 – 196.
11. **Mulle M., Zitoun R., Collombet F., Olivier P., Grunevald Y. H.** Thermal expansion of carbon-epoxy laminates measured with embedded FBGS-Comparison with other experimental techniques and numerical simulation / Compos. A Appl. Sci. Manufact. 2007. N 38. P. 1414 – 1424.
12. **Jaw-Luen Tang, Jian-Neng Wang.** Error Analysis and Measurement Uncertainty for a Fiber Grating Strain-Temperature Sensor / Sensors. 2010. N 10. P. 6582 – 6593.
13. **Latini V., Striano V., Coppola G., Rendina I.** Fiber optic sensors system for high temperature monitoring of aerospace structures / In: Photonic Materials, Devices, and Applications II. 2007 (doi: 10.1117/12.722269).
14. **Jaehoon Jung, Hui Nam, Ju Han Lee, Namkyoo Park, Byoung-ho Lee.** Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier / Appl. Optics. 1999. Vol. 38. N 13. P. 2749 – 2751.
15. **Chun-Liu Zhao, Jiarong Zhao, Wei Jin, Jian Ju, L. Cheng, Xuguang Huang.** Simultaneous strain and temperature measurement using a highly birefringence fiber loop mirror and a long-period grating written in a photonic crystal fiber / Optics Comm. 2009. Vol. 282. P. 4077 – 4080.
16. **Xu M. G., Archambault J. L., Reekie L., Dakin J. P.** Thermally-compensated bending gauge using surface mounted fiber gratings / Int. J. Optoelectron. 1994. Vol. 9. P. 281 – 283.
17. **Zhao Y., Zhao M. G.** Novel force sensor based on a couple of fiber Bragg gratings / Measurement. 2005. N 38. P. 30 – 33.
18. **Sheng H. J., Liu W. F., Lin K. R., Bor S. S., Fu M. Y.** High-sensitivity temperature-independent differential pressure sensor using fiber Bragg gratings / Opt. Express. 2008. Vol. 16. P. 16013 – 16018.
19. **Jin L., Zhang W. G., Zhang H., Liu B., Zhao H., Tu Q. C., Kai G. Y., Dong X. Y.** An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature / IEEE Photon. Tech. Lett. 2006. N 18. P. 154 – 156.
20. **Frazão O., Melo M., Marques P. V. S., Santos J. L.** Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain-temperature discrimination / Meas. Sci. Technol. 2005. N 16. P. 984 – 988.
21. **Xu M. G., Dong L., Reekie L., Tucknott J. A., Cruz J. L.** Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre / Electronics Lett. 1995. Vol. 31. N 70. P. 823 – 825.
22. **Sungchul Kim, Jaejoong Kwon, Sungwoo Kim, Byoung-ho Lee.** Temperature-Independent Strain Sensor Using a Chirped Grating Partially Embedded in a Glass Tube / IEEE Photonics Technol. Lett. 2000. Vol. 12. N 6. P. 678 – 680.
23. **Frazão O., Marques L., Marques J. M., Baptista J. M., Santos J. L.** Simple sensing head geometry using fibre Bragg gratings for strain-temperature discrimination / Opt. Commun. 2007. Vol. 279. P. 68 – 71.
24. **James S. W., Dockney M. L., Tatam R. P.** Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors / Electronics Lett. 1996. Vol. 32. N 12. P. 1133 – 1134.
25. **Shilie Zheng, Xianmin Zhang.** Simultaneous Measurement of Pressure and Temperature Using a Single Fiber Bragg Grating / In: Progress In Electromagnetics Research Symposium. Hangzhou. 2005. P. 420 – 423.

26. Tanaka N., Okabe Y., Nobuo Takeda. Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates / *Smart Mater. Struct.* 2003. N 12. P. 940 – 946.
27. Yoon H. J., Costantini D. M., Limberger H. G., Salathe R. P., Kim C. G., Michaud V. In situ strain and temperature monitoring of adaptive composite materials / *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2006. N 17. P. 1059 – 1067.
28. Cavaleiro P. M., Araújo F. M., Ferreira L. A., Santos J. L., Farahi F. Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using Bragg Gratings Written in Germanosilicate and Boron-Codoped Germanosilicate Fibers / *IEEE Photon. Tech. Lett.* 1999. Vol. 11. N 12. P. 1635 – 1637.
29. Liu H. B., Liu H. Y., Peng G. D., Chu P. L. Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings / *Optics Comm.* 2003. Vol. 219. P. 139 – 142.
30. Frazão O., Santos J. L. Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibres / *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* 2004. N 6. P. 553 – 556.
31. Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Helen L. W. Chan, Chung-Loong Choy, Muhtesem Su Ieyman Demokan. Discrimination between strain and temperature with a single fiber bragg grating / *Microwave Opt. Technol. Lett.* 2002. Vol. 33. N 3. P. 200 – 202.
32. Guan B. O., Tam H. Y., Ho S. L., Chung W. H., Dong X. Y. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating / *Electronics Lett.* 2000. Vol. 36. P. 1018 – 1019.
33. Frazão O., Lima M. J. N., Santos J. L. Simultaneous measurement of strain and temperature using type I and type IIA fibre Bragg gratings / *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* 2003. N 5. P. 183 – 185.
34. Xuewen Shu, Donghui Zhao, Lin Zhang, Ian Bennion. Use of dual-grating sensors formed by different types of fiber Bragg gratings for simultaneous temperature and strain measurements / *Appl. Optics.* 2004. Vol. 43. N 10. P. 2006 – 2012.
35. Suchandan Pal, Tong Sun, Kenneth T. V., Grattan Scott A., Wade Stephen F., Collins Gregory W., Baxter Bernard, Dussardier Gérard, Monnom. Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimised for sensor applications over a wide range of temperatures / *Sensors and Actuators. A.* 2004. Vol. 112. P. 211 – 219.
36. Chehura E., James S. W., Tatam R. P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating / *Opt. Commun.* 2007. N 275. P. 344 – 347.
37. US Pat. 60/019038, Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination, 31.08.1999.
38. Kamineni Srimannarayana, Madhuvarasu Sai Shankar, Ravinuthala L. N. Sai Prasad, T. K. Krishna Mohan, S. Ramakrishna, Srikanth G., Sriramoju Ravi Prasad Rao. Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects / *Optica Appl.* 2008. Vol. XXXVIII. N 3. P. 601 – 608.
39. Wei-Chong Du, Xiao-Ming Tao, Hwa-Yaw Tam. Fiber Bragg Grating Cavity Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature / *IEEE Photonics Technol. Lett.* 1999. Vol. 11. N 1. P. 105 – 107.
40. Rao Y. J., Ran Z. L., Liao X., Deng H. Y. Hybrid LPFG/MEFPI sensor for simultaneous measurement of high-temperature and strain / *Opt. Express.* 2007. Vol. 15. P. 936 – 941.
41. Kang H. K., Kang D. H., Hong C. S., Kim C. G. Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fibre-optic sensors / *Smart Mater. Struct.* 2003. N 12. P. 29 – 35.
42. Singh H., Sirkis J. S. Temperature and strain measurement by combining ILFE and Bragg grating optical fiber sensors / *Experiment. Mech.* 1997. N 37. P. 414 – 419.
43. Guanghui Chen, Liying Liu, Hongzhi Jia, Jimin Yu, Lei Xu, and Wencheng Wang. Simultaneous Strain and Temperature Measurements With Fiber Bragg Grating Written in Novel Hi-Bi Optical Fiber / *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2004. Vol. 16. N 1. P. 221 – 223.
44. Frazão O., Carvalho J. P., Ferreira L. A., Araújo F. M., Santos J. L. Discrimination of strain and temperature using Bragg gratings in microstructured and standard optical fibres / *Meas. Sci. Tech.* 2005. N 16. P. 2109 – 2113.
45. Luyckx G., Voet E., Geernaert T., Chah K., Nasilowski T., De Waele W., Van Paeppegem W., Becker M., Bartelt H., Urbanczyk W., Wojcik J., Degrieck J., Berghmans F., Thienpont H. Response of FBGs in Microstructured and Bow Tie Fibers Embedded in Laminated Composite / *IEEE Photon. Tech. Lett.* 2009. N 21. P. 1290 – 1292.
46. Silva S. F. O., Frazão O., Santos J. L., Araújo F. M., Ferreira L. A. Discrimination of Temperature, Strain, and Transverse Load by Using Fiber Bragg Gratings in a Twisted Configuration / *IEEE Sensors J.* 2006. Vol. 6. N 6. P. 1609 – 1613.
47. Lin C. M., Liu Y. C., Liu W. F., Fu M. Y., Sheng H. J., Bor S. S., Tien C. L. High-sensitivity simultaneous pressure and temperature sensor using a superstructure fiber grating / *IEEE Sensors J.* 2006. N 6. P. 691 – 696.
48. Hao Chi, Xiao-Ming Tao, Dong-Xiao Yang. Simultaneous measurement of axial strain, temperature, and transverse load by a superstructure fiber grating / *Optics Lett.* 2001. Vol. 26. N 24. P. 1949 – 1951.
49. Triollet S., Robert L., Marin E., Ouerdane Y. Discriminated measures of strain and temperature in metallic specimen with embedded superimposed long and short fibre bragg gratings / *Meas. Sci. Tech.* 2011. Vol. 22. N 1 (doi: 10.1088/0957-0233/22/1/015202).
50. Frazzo O., Romero R., Rego G., Marques P. V. S., Salgado H. M., Santos J. L. Sampled fibre Bragg grating sensors for simultaneous strain and temperature measurement / *Electronics Lett.* 2002. Vol. 38. N 14. P. 693 – 695.
51. Triollet S., Robert L., Marin E., Ouerdane Y. Superimposed long period and short period Bragg grating sensor for LRI monitoring / In: 20-th International Conference on Optical Fibre Sensors / *Proc. of SPIE.* 2009. (doi: 10.1117/12.836565).
52. Demirel M., Robert L., Molimard J., Vautrin A., Orteu J.-J. Strain and temperature discrimination and measurement using superimposed fiber bragg grating sensor / *Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics.* — Alexandroupolis, Greece, 2007. P. 639 – 640.
53. Xu M. G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J. P. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensor / *Electronics Lett.* 1994. Vol. 30. N 13. P. 1085 – 1087.
54. Ilda Abe, Hypolito J. Kalinowski, Orlando Frazão, Jose L. Santos, Rogerio N. Nogueira, Joao L. Pinto. Superimposed Bragg gratings in high-birefringence fibre optics: three-parameter simultaneous measurements / *Meas. Sci. Technol.* 2004. Vol. 15. P. 1453 – 1457.
55. Caucheteur C., Lhomme F., Maakaroun F., Chah K., Blondel M., Megret P. Simultaneous strain and temperature sensor using superimposed tilted Bragg gratings / *Proceedings Symposium IEEE/LEOS.* Ghent: Benelux Chapter. 2004. P. 219 – 222.
56. Brady G. P., Kalli K., Webb D. J., Jackson D. A., Reekie L., Archambault J. L. Simultaneous measurement of strain and temperature using the first- and second-order diffraction wavelengths of Bragg gratings / *IEEE Proc.-Optoelectron.* 1997. Vol. 144. N 3. P. 156 – 161.
57. Echevarria J., Quintela A., Jáuregui C., López-Higuera J. M. Uniform Fiber Bragg Grating First- and Second-Order Diffraction Wavelength Experimental Characterization for Strain-Temperature Discrimination / *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2001. Vol. 13. N 7. P. 696 – 698.
58. Yam S. P., Brodzeli Z., Wade S. A., Baxter G. W., Collins S. F. Use of first-order diffraction wavelengths corresponding to dualgrating periodicities in a single fiber Bragg grating for simultaneous temperature and strain measurement / In: 19-th International Conference on Optical Fibre Sensors. 2008 (doi: 10.1117/12.786906).
59. Oh S. T., Han W. T., Paek U. C., Chung Y. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect / *Optics Express.* 2004. Vol. 12. N 4. P. 724 – 729.
60. Wong A. C. L., Childs P. A., Peng G. D. Spectrally-overlapped chirped fibre Bragg grating sensor system for simultaneous two-parameter sensing / *Meas. Sci. Tech.* 2007. N 18. P. 3825 – 3832.
61. Vikram Bhatia, David Campbell, Richard O. Claus. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings / *Optics Lett.* 1997. Vol. 22. N 9. P. 648 – 650.
62. Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Xiao-Ming Tao, Xiao-Yi Dong. Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating / *IEEE Photon. Tech. Lett.* 2000. Vol. 12. N 6. P. 675 – 677.
63. Haber T. C., Ferguson S., Guthrie D., Graver T. W., Soller B. J. Analysis, Compensation and Correction of Temperature Effects on FBG Strain Sensors / In: *Fiber Optic Sensors and Applications X*, Proc. of SPIE. 2013 (doi: 10.1117/12.2018772).
64. Da-Peng Zhou, Li Wei, Wing-Ki Liu, Yu Liu, John W. Y. Li. Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers / *Appl. Optics.* 2004. Vol. 47. N 10. P. 1668 – 1672.
65. Chen G. H., Liu L. Y., Jia H. Z., Yu J. M., Xu L., Wang W. C. Simultaneous pressure and temperature measurement using Hi-Bi fiber Bragg gratings / *Opt. Commun.* 2003. N 228. P. 99 – 105.