EDN: AVWSZB DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.21.2.003
УДК 621.383 *2.2.6, 2.2.7, 2.2.8*

ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ФРЕНЕЛЕВСКО-БРЭГГОВСКОГО ТИПА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПЛОСКИХ ЛИСТОВЫХ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Д. Даххам, И. Алишеров, А.З. Петрова, А.Н. Шарафутдинов, Э.В. Белов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

Аннотация. Предлагается термокомпенсированный последовательно-параллельный двухканальный датчик френелевско-брэгговского типа для мониторинга отверждения плоских листовых термореактивных полимерных композитных материалов (ТРПКМ). Мониторинг в первом канале основан на измерении коэффициента отражения Френеля на границе раздела оптическое волокно/эпоксидная смола при его зондировании двухчастотном лазерным излучением, сформированным в фазовой двухкомпонентной адресной волоконной брэгговской структуре (АВБС). Показатель преломления эпоксидной смолы изменяется на разных стадиях отверждения, что выражается в изменении коэффициента отражения Френеля. Состояние отверждения определяется путем мониторинга изменения отраженной интенсивности на частоте биений компонент АВБС. При этом фазовая АВБС дополнительно служит термометром для реализации термокомпенсации первого канала. Использование двух волновых АВБС во втором канале помогает отделить температурно-индуцированные перекрестные эффекты от деформационных, вызванных отверждением смолы. Это достигается помещением одной волновой АВБС в эпоксидную смолу, а вторую вне ее в непосредственной близости, позволяющей учитывать температуру обрабатываемого ТРПКМ для реализации термокомпенсации второго канала. Для обработки информации в обоих каналах используется радиофотонный интеррогатор для опроса АВБС с высокой точностью. В ходе экспериментов, проведенных в резонаторно-рупорном микроволновым технологическом комплексе, доказана самодостаточность любого из каналов. При этом поставлена задача комплексного их использования при условии выполнения каналов на волокнах различного типа, что позволит более эффективно отделять температурно-индуцированные перекрестные эффекты от деформационных, что особенно важно при мониторинге отверждения плоских листовых ТРПКМ с сохранением его формы.

Ключевые слова: термореактивные полимерные композитные материалы, френелевский датчик, брэгговский датчик, адресная волоконная брэгговская структура, температура, деформация, термокомпенсация, радиофотонный интеррогатор, микроволновый технологический комплекс.

Введение

Волоконно-оптические датчики (ВОД) привлекают все большее внимание не только, благодаря их возможностям в области структурного мониторинга состояния инженерных сооружений [1], выполненных из композитных материалов, но и в приложениях связанных с мониторингом процессов их изготовления, например, мониторингом остаточной деформации в процессе отверждения термореактивных материалов [2, 3]. Было показано, что способность ВОД к мониторингу деформации позволяет указывать на фазовые изменения во время отверждения [4], а их высокий потенциал для мониторинга собственно отверждения в реальном времени был подтвержден в [5]. Сегодня появление новых технологий для создания и интеррогации ВОД, методов раздельной обработки информации, полученной

с них, по температуре и деформациям, а именно, технологии адресных волоконных брэгговских структур [6-7], радиофотонные методы их опроса [8], метод двух волокон [9] соответственно открывают новые перспективы для совершенствования решений указанного класса задач.

Среди основных типов ВОД, применяемых для мониторинга процесса отверждения термореактивных полимерных композитных материалов (ТРПКМ), можно выделить рефрактометрические датчики на основе закона Френеля, учитывающие изменение их оптических характеристик в процессе обработки и деформационные датчики на основе закона Брэгга – волоконные брэгговские решетки (ВБР), комплексно учитывающие тепловые и механические деформации при их изготовлении.

В ВОД рефрактометрического типа используется волокно с частично удаленной оболочкой, в котором открытая часть сердцевины контактирует с ТРПКМ. Изменение отраженного светового сигнала контролируется с использованием закона Френеля для вычисления показателя преломления (ПП) исследуемого материала, который затем можно связать с его плотностью ρ с помощью закона Лоренца-Лоренца [10].

При использовании ВБР приложенная деформация меняет период модуляции ПП сердцевины волокна, что вызывает сдвиг длины волны Брэгга. В общем сдвиге присутствуют две компоненты, вызванные деформациями механической (при отверждении ТРПКМ) и тепловой (при изменении его температуры) компонент. Разделение этих компонент является важной частью интерпретации сдвига длины волны и предъявляет особые требования к системам интеррогации [11].

В ВОД рефрактометрического типа изменения интенсивности отраженного света, как правило соотносятся, с ключевыми событиями отверждения. Оптическое волокно с удаленным участком оболочки использовалось для мониторинга отверждения препрега из бисмалеимида (BMI) и углеродного волокна путем мониторинга затухания изменения интенсивности света в [12]. В этом исследовании минимальное затухание было отнесено к минимальной вязкости смолы, увеличение — к процессу сшивания, а конечное плато было соотнесено с концом реакции отверждения, что было также подтверждено численной моделью. В [13] этот метод использовался для оценки интенсивности отраженного света во время отверждения композита из углеродного волокна, пропитываемого эпоксидной смолой. В процессе инфузии было отмечено резкое падение сигнала датчика, соответствующее поступлению смолы. Что касается отверждения, быстрое увеличение интенсивности света было связано с затвердеванием и увеличением плотности во время сшивания, а последующее плато коррелировало с окончанием реакции.

При использовании ВБР наиболее распространенная интерпретация событий отверждения следует аналогичной тенденции, что и интерпретация интенсивности рефрактометрических сигналов:

1. Наблюдается начальный спад сигнала из-за повышения температуры, поскольку смола все еще жидкая и не передает деформацию на волокно;

2. Наблюдается увеличение измерения деформации из-за реакции сшивания;

3. Измерение стабилизируется после завершения отверждения, когда матрица фиксирует волокно на месте.

Особый интерес вызывает вариант комбинированного применения методов. Оценка отверждения эпоксидной смолы с использованием двух типов оптических волокон, содержащих соответственно оптический ВОД на основе закона Френеля и ВБР, коррелировала с результатами обеих стратегий мониторинга интенсивности света и деформации [11]. Сигнал оптического волокна оценивался с использованием трехфазной оценки, подробно описанной выше, тогда как длина волны Брэгга определяла пиковое значение как начало гелеобразования, а плато сигналов указывало на завершение отверждения.

Основной недостаток обеих методов – температурная зависимость френелевских и брэгговских чувствительных элементов, которые оказывают существенное влияние на вычисляемые значения ПП как ТРПКМ, так и волокна. Технологии калибровки и термокомпенсации, существующие на сегодняшний день, не всегда оправдывают свои возможности, или очень дороги.

Учитывая эти недостатки, целью работы является содание термокомпенсированного датчика для мониторинга процесса отверждения термореактивных материалов с использованием современных технологий адресных волоконных брэгговских структур, радиофотонных методов опроса и метода двух волокон. Такой комплексный подход позволит получить компактный полностью оптический термокомпенсированный адресный датчик с дешевым радиофотонным интеррогатором, состоящим из волоконно-оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой и фотоприемника, а также возможностью раздельного и одновременного измерения компонент механических и тепловых деформаций в процессе отверждения термореактивных материалов и изменений интенсивности френелевского отражения на промежуточной (адресной) частоте с высоким отношением сигнал/шум. Адресность датчика даст возможность адресного мультиплексирования их множества при контроле процесса отверждения крупногабаритных изделий из ТРПКМ. Как направление дальнейших исследовании разрабатываемый датчик может быть изготовлен на двух разных волокнах, что позволит повысить эффективность одновременного измерения тепловых и механических деформации при изготовлении композитных изделий.

Далее статья построена следующим образом. В разделе 1 обсуждаются вопросы зависимости измерения ПП материала френелевским и брэгговским датчиками в условиях изменения температуры и меры преодоления, вызванных ею, недостатков. В разделе 2 представлена структурная схема датчика на основе адресных волоконных брэгговских структур и системы радиофотонного опроса. В разделе 3 обсуждаются вопросы экспериментальной проверки теоретических моделей. В заключение обсуждаются результаты работы и направления дальнейших исследований.

1. Френелевские и брэгговские сенсоры для мониторинга процесса отверждения термореактивных полимерных композитных материалов

1.1. Френелевские сенсоры

Зависимость интенсивности отражения, регистрируемой с помощью оптико-электронного интеррогатора оптического волокна для измерения показателя преломления, описывается уравнениями Френеля, которые связывают граничное отражение падающего света от двух контактирующих оптически прозрачных материалов и ПП этих материалов.

На рис. 1 иллюстративно представлена ситуация контакта оптического волокна с ТРПКМ.

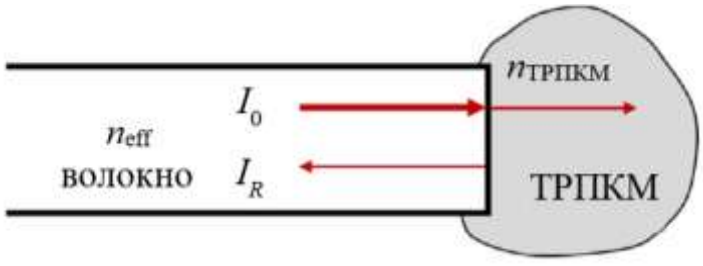


Рис. 1. Иллюстративное представление френелевского отражения от ТРПКМ

Предполагая нормальное падение света и плоские граничные поверхности сколотого прямого конца оптического волокна, погруженного в ТРПКМ (рис. 1), уравнения Френеля упрощаются до:

$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{\left(n_{\text{eff}} - n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2}{\left(n_{\text{eff}} + n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2}, \tag{1}$$

где I_R и I_0 – интенсивности отраженного и падающего света, а n_{eff} и $n_{\text{ТРПКМ}}$ – ПП оптического волокна и ТРПКМ соответственно.

Интенсивность падающего света, излучаемого лазерным источником света измерительного устройства, может изменяться во времени в силу разных причин. Для исключения влияния этого параметра на измерения, носящие амплитудный характер, был введен опорный канал с эталонным измерением интенсивности отраженного света в известной среде, пренебрегая потерями в оптическом тракте. Для этого интенсивность падающего света I_0 была откалибрована по окружающему воздуха с n_{air}=1,00027 при температуре T=23 °C [14], что дало соответствующее $I_{R\text{air}}$. Таким образом, уравнение (1) принимает форму:

$$\frac{I_R}{I_{R\text{air}}} = \frac{\left(n_{\text{eff}} - n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2}{\left(n_{\text{eff}} + n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2} \frac{\left(n_{\text{eff}} + n_{\text{air}}\right)^2}{\left(n_{\text{eff}} - n_{\text{air}}\right)^2}. \tag{2}$$

Решая квадратное уравнение (2) для показателя преломления ТРПКМ, получаем:

$$n_{\text{ТРПКМ}} = n_f\left(T\right)\frac{1+a}{1-a} \;\forall n_{\text{ТРПКМ}} \geq n_{\text{eff}} \text{ при } a = \frac{\left(n_{\text{eff}} - n_{\text{air}}\right)}{\left(n_{\text{eff}} + n_{\text{air}}\right)}\sqrt{\frac{I_R}{I_{R\text{air}}}}. \tag{3}$$

Влияние температуры на ПП оптического волокна определяется как:

$$n_f\left(T\right) = n_{\text{eff}} + \text{ТОС}\left(T - T_0\right), \tag{4}$$

где T_0 равна 23 °C, а эффективный показатель преломления n_{eff}=1,4473 оптического волокна SMF28e, использованного в [15], с термооптическим коэффициентом ТОС плавленого кварца 8,7 x 10^{-6} [16]. Оптическое волокно, как правило, легировано другими элементами, и не состоит исключительно из плавленого кварца. Тот факт, что степень легирования оптического волокна изменяет этот параметр и его зависимость от температуры, как показано в [17–19], был проигнорирован в данном анализе.

Корреляция ПП и коэффициента теплового расширения (КТР) далее используется в уравнении Лоренца-Лоренца [10], которое связывает плотность ТРПКМ $\rho_{\text{ТРПКМ}}$ и ПП $n_{\text{ТРПКМ}}$ при условии его оптической прозрачности или полупрозрачности по крайней мере до определенной степени:

$$\rho_{\text{ТРПКМ}} = \frac{1}{r}\frac{{n_{\text{ТРПКМ}}}^2 - 1}{{n_{\text{ТРПКМ}}}^2 + 2}, \tag{5}$$

при этом удельное значение рефракции r остается неизвестным. Анализ этого параметра требует дополнительных трудоемких экспериментов и инфраструктуры для их проведения, что снижает преимущество прямого определения КТР по ПП.

В [20] предположили, что изменения ПП, связанные с температурой, преимущественно связаны с изменениями плотности ТРПКМ. Следовательно, $n_{\text{ТРПКМ}}$ считается постоянным и независимым от влияния температуры. При преобразовании плотности в КТР изотропного материала последний напрямую связан с ПП.

$$\alpha_{\text{ТРПКМ}} = \frac{-2n_{\text{ТРПКМ}}}{\left(n^2{}_{\text{ТРПКМ}} + 2\right)\left(n^2{}_{\text{ТРПКМ}} - 1\right)}\Psi, \tag{6}$$

где $\Psi = \mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ – производная для определения зависящего от температуры КТР. Линейное изменение ПП в широком диапазоне температур определяется как $\Psi = \Delta n/\Delta T$.

1.2. Брэгговские сенсоры

ВБР связывают основную моду в сердцевине волокна с той же модой, распространяющейся в противоположном направлении. Это означает, что на определенной длине волны распространяющееся по волокну излучение отражается от решётки полностью или частично [21]. Свойства этого отражения зависят от параметров решётки. Для однородной решётки длины L коэффициент отражения R на резонансной длине волны λ_{BG} выражается как

$$R = tn^2\left(kL\right), \tag{7}$$

где $k = \pi\Delta n_{mod}\eta_{BG} / \lambda_{BG}$ – коэффициент связи (Δn_{mod} – амплитуда синусоидальной модуляции ПП волокна; η_{BG} – часть мощности моды, которая распространяется по сердцевине волокна).

Типовой принцип формирования информации с помощью ВБР показан на рис. 2.

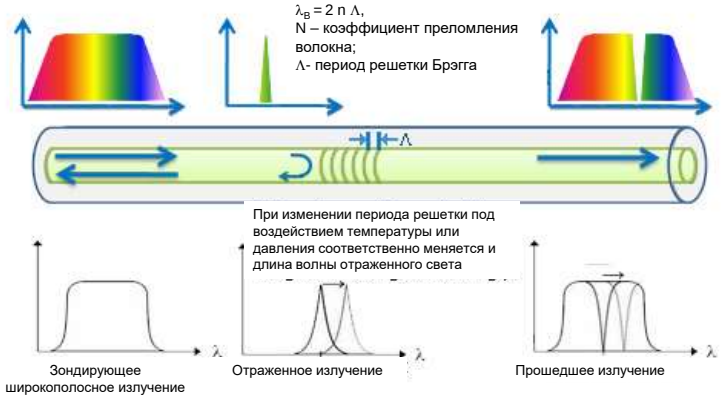


Рис. 2. Принцип работы ВОД на основе ВБР

Спектральная ширина резонанса однородной решётки на полувысоте (FWHM) может быть выражена следующим приближенным соотношением:

$$\Delta\lambda_{FWHM}^{BG} \approx 2\lambda_{BG}\gamma\sqrt{\left(\eta_{BG}\Delta n_{\text{mod}} / 2n_{\text{eff}}\right)^2 + \left(\Lambda / L\right)^2}, \tag{8}$$

где γ – параметр порядка единицы для решёток с коэффициентом отражения $R \sim 1$ и около 0,5 для слабоотражающих решёток.

Огибающую спектра ВБР (гауссовский контур) по отражению R, выраженную через расстройку δ, можно определить как:

$$R = \frac{\sinh^2\left[\kappa L\sqrt{1-\left(\delta/\kappa\right)^2}\right]}{\cosh^2\left[\kappa L\sqrt{1-\left(\delta/\kappa\right)^2}\right]-\left(\delta/\kappa\right)^2}, \quad (9)$$

где L – длина ВБР; (δ/κ) – относительная расстройка. Расстройка ВБР с периодом Λ равна $\delta = \Omega - (\pi/\Lambda)$, где $\Omega = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$.

Центральная (брэгговская) длина волны ВБР λ_{BG} зависит от температуры волокна и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений.

Эта зависимость описывается следующим уравнением [21]:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n_{\text{eff}}\Lambda\left(\begin{array}{c}\left\{1-\left(n_{\text{eff}}{}^2/2\right)\left[P_{12}-\nu\left(P_{11}+P_{12}\right)\right]\right\}\varepsilon+\\ +\left[\alpha+\left(1/n_{\text{eff}}\right)\left(\partial n_{\text{eff}}/\partial T\right)\right]\Delta T\end{array}\right) \quad (10)$$

где ΔT – изменение температуры; ε – приложенное механическое напряжение; P_{ij} – коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

Это соотношение дает типичный сдвиг λ_{BG} в зависимости от температуры ~0,01 нм/°К и от относительного удлинения волокна ~ $10^3\,\Delta L/L$ нм.

При квазистатических и статических измерениях деформации в практических приложениях часто наблюдаются значительные колебания температуры. Следовательно, необходима температурная компенсация влияния колебаний температуры окружающей среды. Для достижения этой цели был предложен ряд методов, позволяющих одновременно измерять деформацию и температуру: эталонной ВБР, наложенных ВБР на двух длинах волн, гармонической модуляции, комбинированного использования ВБР и длиннопериодных решеток, комбинированного использования ВБР и интерферометров Фабри-Перо, метод ВБР, записанных в волокнах с разным диаметром и др. [22].

Среди множества методов раздельного измерения тепловой и механической деформации выберем метод опорной ВБР, как разновидность метода опорной решетки, и метод двух волокон, как метод обобщающий реализацию методов типа двух ВБР, записанных в волокнах разного диаметра. Преимущества первого метода рассмотрим в ходе обсуждения принципов построения двух волоконного последовательно-параллельного датчика отверждения ТРПКМ в следующем разделе. Второй метод, как говорилось ранее, будет предметом будущих работ.

2. Принципы построения двухканального последовательно-параллельного френелевско-брэгговского датчика отверждения ТРПКМ

Структурная схема двух волоконного последовательно-параллельного датчика отверждения ТРПКМ показана на рис. 3. Функциональная схема радиофотонного интеррогатора (РФИ) для опроса френелевского и брэгговского датчиков для измерения параметров ТРПКМ и брэгговских датчиков термокомпенсации представлена на рис. 4. Все брэгговские

датчики выполнены на основе двухкомпонентных адресных волоконных брэгговских структур (АВБС): 3.2 и 3.4 – волнового типа λ-АВБС, 3.3 – фазового π-АВБС [6, 7].

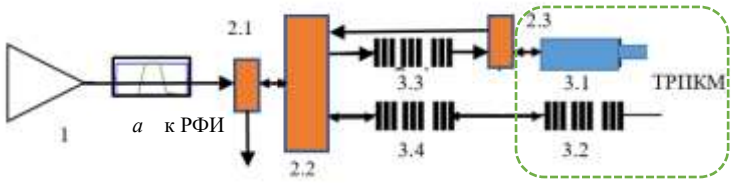


Рис. 3. Структурная схема двух волоконного последовательно-параллельного датчика отверждения ТРПКМ:
1 – широкополосный лазерный источник;
2.1 – 2.3 – комбинированные волоконно-оптические разветвители/объединители;
3.1 – френелевский сенсор в ТРПКМ; 3.2 – λ-АВБС измерения деформации в ТРПКМ, чувствительная к температуре;
3.3 – π-АВБС формирования двухчастотного излучения;
3.4 – опорная λ-АВБС измерения температуры для термокомпенсации;
вставка *a* – спектр излучения ЛД

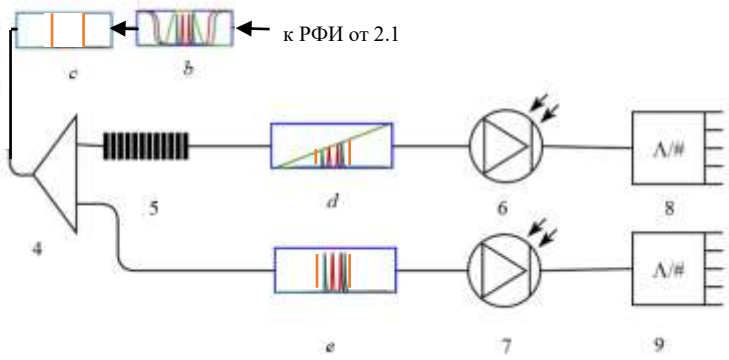


Рис. 4. Функциональная схема РФИ:
4 – разветвитель 1×2; 5 – волоконно-оптический линейный наклонный фильтр; 6 – измерительный фотоприемник; 7 – опорный фотоприемник по λ-АВБС; 8 – измерительный АЦП; 9 – опорный АЦП; вставки *b*-*e* схематично отражают спектральные диаграммы оптических сигналов на соответствующих участках схемы, причем *b* – сигнал от двух λ-АВБС, *c* – сигнал от одной π-АВБС

Широкополосный лазерный источник (ШЛИ) со встроенным частотным фильтром, формирующий диапазон длин волн, соответствующий диапазону измерений, *1* генерирует непрерывное излучение (диаграмма *a*), которое проходя через комбинированные волоконно-оптические разветвители/объединители *2.1* и *2.2*, поступает на двух волоконный последовательно-параллельный датчик отверждения ТРПКМ. Нижнее плечо состоит из опорной λ-АВБС измерения температуры для термокомпенсации *3.4* с адресной частотой f_{A1} и λ-АВБС брэгговского датчика для измерения деформации ТРПКМ, чувствительной к температуре, с адресной частотой f_{A2}. Верхнее плечо датчика состоит из π-АВБС формирования двухчастотного излучения *3.3*, с адресной частотой f_{A3}, которое далее поступает на френелевский датчика *3.1*.

Отраженное от френелевского датчика двухчастотное излучение через комбинированные волоконно-оптические разветвители/объединители *2.3*-*2.1* поступает на вход РФИ (диаграмма *c*, рис. 4). Каждая из двух λ-АВБС формирует два двухчастотных излучения с разными адресными частотами f_{A1} и f_{A2} и также через комбинированные волоконно-оптические разветвители/объединители *2.2*-*2.1* поступает на вход РФИ (диаграмма *b*, рис. 4). Адресные частоты f_{A1}, f_{A2} и f_{A3} уникальны и не равны друг другу, хотя все АВБС могут иметь общую центральную длину волны.

Отраженное объединенное шестичастотное излучение с обоих плеч проходит через оптоволоконный разветвитель *4*, который делит оптический сигнал на два канала – измерительный и опорный для контроля мощности. В измерительном канале установлен волоконно-оптический наклонный линейный фильтр *5*, модифицирующий амплитуды откликов френелевского и брэгговского датчиков в асимметричное излучение (диаграмма *d*), после чего сигнал поступает на измерительный фотоприемник *6* и принимается на измерительный АЦП *8*. В опорном канале сигнал (диаграмма *e*) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала *7* и принимается на опорный АЦП *9*. В качестве опорного сигнала берется отраженное излучение от двух λ-АВБС, поскольку отраженное излучение от френелевского датчика может меняться по амплитуде. Зная адресные частоты двух λ-АВБС выделить опорное излучение достаточно просто.

Все дальнейшие вычисления идут с отношением мощностей в измерительном и опорном каналах.

2.1 Определение отклика брэгговского датчика

Суммарный оптический отклик от двух λ-АВБС имеет вид:

$$F(t) \sim \begin{pmatrix} A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + B_1 \cdot \sin((\omega_1 + \Omega_1) \cdot t) \\ + A_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) + B_2 \cdot \sin((\omega_2 + \Omega_2) \cdot t) \end{pmatrix}^2, \quad (11)$$

Мощность светового потока (11) после фотоприемника и частотных фильтров, настроенных на адресные частоты $\Omega_1=2\pi f_{A1}$ и $\Omega_2=2\pi f_{A2}$, примет вид радиосигнала биений:

$$U(t) \sim \left[A_1 B_1 \cos(\Omega_1 t) + A_2 B_2 \cos(\Omega_2 t) \right]. \quad (12)$$

Отметим, что частотные фильтры, не отражены на рис. 4, поскольку могут быть реализованы в программном обеспечении для обработки информации датчика.

Преобразуем это уравнение к виду

$$F(U(t))\big|_{\Omega_i} \sim A_i B_i \cos(\Omega_i t) = D_i \cos(\Omega_i t), \; i = \overline{1, 2}, \quad (13)$$

который дает два соотношения для нахождения четырех неизвестных A_1, B_1, A_2, и B_2.

Примем во внимание, что для связи амплитуд A_i и B_i в случае наклонного линейного фильтра *5* дополнительно выполняются соотношения:

$$A_i = B_i + u \cdot \Omega_i. \quad (14)$$

как следствие уравнения прямой линии для фильтра *5* и постоянных адресных частот λ-АВБС.

Следовательно, из (13) выбираем единственное решение:

$$A_i = \left(\sqrt{(u\Omega_i)^2 + 4D_i} - u\Omega_i \right) \Big/ 2 \geq 0, \; i = \overline{1, 2}, \quad (15.1)$$

$$B_i = \left(\sqrt{(u\Omega_i)^2 + 4D_i} + u\Omega_i \right) \Big/ 2 \geq 0, \; i = \overline{1, 2}, \quad (15.2)$$

Таким образом, задача нахождения амплитуд всех частотных составляющих и их амплитуд A_1, B_1, A_2, и B_2 для измерительной системы с двумя λ-АВБС брэгговского датчика решается полностью. Зная величины амплитуд, можно определить и центральные длины волн λ-АВБС или вычислить коэффициент модуляции, и определить их положение, исходя из величины коэффициента модуляции. Напомним, в ходе процесса отверждения ТРПКМ λ-АВБС *3.2* подвержена влиянию деформации и температуры, λ-АВБС *3.3* – только температуры для термокомпенсации измерений деформации.

2.2 Определение отклика френелевского датчика

Принцип определения степени отверждения на френелевском датчике заключается в измерении амплитуды френелевского отражения, возникающего от конца волокна, погруженного в связующее ТРПКМ, в соответствии с изменением показателя преломления в ходе технологического процесса [23]. Коэффициенты Френеля отражения мощности излучения от конца волокна, погруженного в смолу, (R_w) можно определить по формуле:

$$R_w(t) = \left[\left(n_f - n_w(t)\right)/\left(n_f + n_w(t)\right)\right]^2, \tag{16}$$

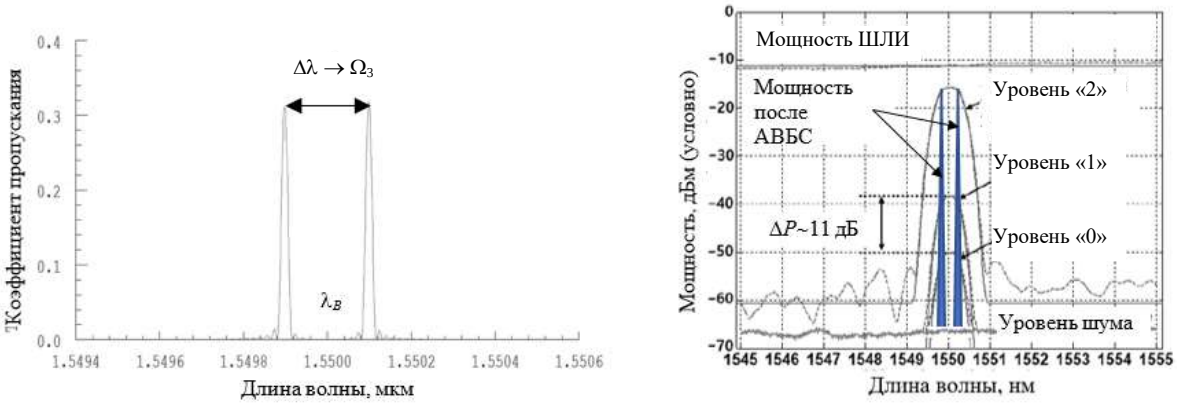
где n_f – показатель преломления волокна, $n_w(t)$ – показатель преломления смолы, зависящего от степени отверждения.

Отраженное от френелевского датчика двухчастотное излучение, сформированное в π-АВБС и имеющее мощность, соответствующую коэффициенту отражения (16), поступает на фотоприемник. После фотоприемника и частотного фильтра, настроенного на адресную частоту $\Omega_3=2\pi f_{A3}$, оно преобразуется в радиосигнал биений:

$$U^w(t) \sim R_w(t) A_3 B_3 \cos(\Omega_3 t). \tag{17}$$

В других точках спектра, не равных частотам компонент π-АВБС, значения для (17) математически равны 0, а физически – уровню шума канала. При этом амплитуды A_3 и B_3 равны, а коэффициент модуляции равен 1. После наклонного фильтра с учетом изменения температуры π-АВБС задача решается аналогично (15.1)-(15.2), что свидетельствует о том, что данная структура также чувствительна к температуре.

На рис. 4,*а* показан спектр на выходе π-АВБС, а на рис. 4,*б* спектр на входе фотоприемника во френелевском измерительном канале.



а *б*

Рис. 5. Спектр пропускания π-АВБС (*а*)
и спектр на входе фотоприемника в измерительном канале (*б*)

Как видно, спектр представляет собой две компоненты с уровнем «0», что свидетельствует о контакте датчика со смолой, и с уровнем «1» – стадия гелеобразования. Наибольшая амплитуда соответствует уровню «2», после отверждения ТРПКМ.

Измеряя мощность сигнала биений между двумя компонентами в измерительном канале, по разности их мощностей определяются уровни отверждения «0», «1», «2» или соответствующие промежуточные значения между ними.

3. Экспериментальные исследования

Анализ научно-технической литературы, а также данных предварительных экспериментов показывает, что применение СВЧ-технологий позволяет интенсифицировать процессы изготовления изделий из препрегов ТРПКМ [24-29]. Так как полимерное связующее, входящее в состав ТРПКМ, относится к полярным диэлектрикам, то на СВЧ-частотах воздействия основной вклад в обобщенную поляризацию молекул (так же и в вид образуемой матрицы) вносят дипольная и объемная виды поляризации [29]. При управлении степенью включения каждого из видов поляризации возникает возможность «информационного» воздействия и получения изделия с иными, улучшенными характеристиками по отношению к традиционным (температурным) методам изготовления.

Кроме того, преимуществом СВЧ-технологий является увеличение скорости достижения вязкотекучего состояния и стадии отверждения ТПКМ за счет отклика на электромагнитное поле СВЧ-диапазона практически во всем объеме обрабатываемого материала без потерь.

Перечисленные преимущества можно реализовать в различных вариантах микроволновых технологических комплексов. По способу возбуждения ЭМП, СВЧ-комплексы условно подразделяются на одноэлементные и многоэлементные. Нами в [30] проведены исследования и выбрана для экспериментов схема установки (рис. 6), которая позволяет обеспечить достаточную равномерность температурного поля по площади ТРПКМ. В ряде важных практических случаев этого оказывается достаточно, а схема установки позволяет осуществлять, в частности, изготовление протяженных плоских изделий из ТРПКМ.

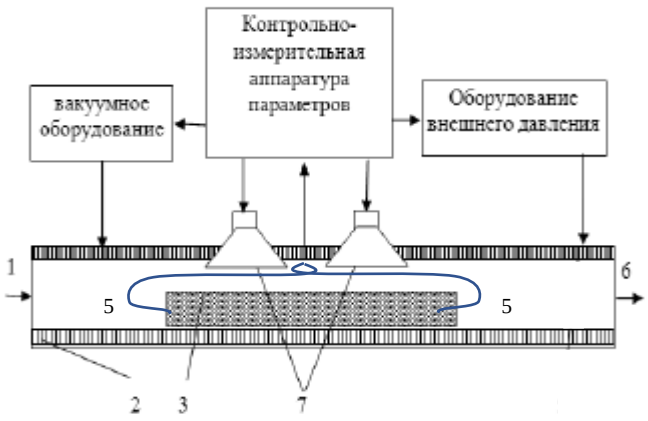


Рис. 6. Обобщенная блок-схема многоэлементного МВТК отверждения ТРПКМ
на основе закрытой резонаторно-рупорной камеры:
1 – система загрузки изделия; 2 – радиопоглощающий материал; 3 – изделие из ТРПКМ;
4 – система распределенных излучателей микроволнового поля; 5 – волоконно-оптический канал с френелевским и брэгговским датчиками в ТРПКМ: 6 – система выгрузки изделия; 7 – система распределенных СВЧ-генераторов и рупорных излучателей

Испытания на отверждение ТРПКМ проводились при температуре 90 °С по аналогии с методикой [11].

В табл. 1 показаны результаты изотермических испытаний.

Табл. 1. Показания датчика Френеля (ДФ) и АВБС при 90 °С, поддерживаемых в зоне обработки ТРПКМ с помощью адаптивного управления МВТК (рис. 6)

Время, мин	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Напряжение ДФ, мВ	0,53	0,45	0,51	0,55	0,59	0,68	0,73	0,73	0,73
Длина волны АВБС *3.2*, нм	1550,21	1550,86	1551,37	1552, 5	1551,08	1550,90	1550,73	1550,73	1550,73

Выходной сигнал френелевского датчика (первый ряд табл. 1) показывает начальное снижение по мере уменьшения плотности смолы при приложении СВЧ-энергии и возникновения внутреннего тепла ТРПКМ с достижением температуры 90 °С. На начальной стадии сшивания выходные сигналы увеличиваются по мере изменения показателя преломления смолы. Наконец, полностью отвержденная смола сохраняет показатель преломления и плотность в качестве постоянных параметров.

Для создания плоского конца волокна оболочки и акриловые покрытия одномодовых оптических пигтейлов SMF28e с оболочкой 125 мкм и диаметром сердцевины 8,2 мкм были очищены и обрезаны. Эти пигтейлы были подключены к радиофотонному интеррогатору в блоке контрольно-измерительной аппаратуры через разъемы LC/APC. Выходные сигналы френелевского датчика четко показывают начало сшивания полимерных цепей и завершение отверждения в реальном времени.

Для сравнения брэгговский датчик был расположен в том же образце. Его выходные сигналы были записаны и показаны во втором ряду табл. 1 в зависимости от времени отверждения. Температура окружающей среды была зафиксирована на уровне 90 °С датчиком на АВБС *3.4*. В отличие от показаний френелевского датчика, длина волны Брэгга непрерывно увеличивалась до начала гелеобразования. В жидком состоянии датчик на основе АВБС *3.2* также не реагировал на фактор напряжения, а реагировал только на изменение температуры. Развитие сшивания полимерных цепей приводит к образованию более плотных структур в ТРПКМ с более высокой вязкостью и молекулярной массой в экзотермической реакции. Когда высоковязкая жидкость переходит в гелеобразное состояние, напряжение, вызванное усадкой эпоксидной смолы, приводит к резкому уменьшению брэгговской длины волны АВБС *3.2*, что указывает на начало гелеобразования. Когда эпоксидная смола переходит в твердую форму, приложенные напряжения действуют постоянно, фиксируя конечное значение брэгговской длины волны АВБС *3.2*.

Табл. 1 показывает сравнение показаний датчика Френеля с показаниями датчика АВБС *3.2*. Показания различных датчиков хорошо совпадают по временной шкале, что указывает на завершение отверждения при 90 °С примерно за 30 минут, что в два раза быстрее, чем в [11] за счет применения СВЧ-технологий нагрева. Признаком гелеобразования является резкое падение длины волны Брэгга, вызванное увеличением плотности в результате сшивания полимерных цепей. Оба сигнала имеют зоны со стабильными значениями, что свидетельствует о завершении отверждения. Таким образом, каждый из каналов разработанного датчика самодостаточен. Более высокую степень подавления температурно-индуцированных погрешностей мониторинга деформаций можно достичь, используя метод двух волокон [9], что является предметом дальнейших исследований.

Заключение

Предлагается волоконно-оптическая система мониторинга процесса отверждения плоских листовых ТРПКМ, осуществляемая в микроволновом технологическом комплексе. Из проведенных и описанных в данной статье исследований очевидно, что френелевские и брэгговские датчики могут эффективно использоваться в качестве датчиков мониторинга отверждения в реальном времени. Начало гелеобразования и завершение отверждения могут быть успешно обнаружены путем объединения обоих выходных сигналов без неоднозначности, вызванной температурным эффектом.

Появление новых технологий для создания и интеррогации ВОД, методов раздельной обработки информации, полученной с них по температуре и деформациям, а именно, технологии АВБС и радиофотонных методов их опроса соответственно, открывают новые перспективы для совершенствования решений указанного класса задач по точности мониторинга. В ряде работ [6, 7] показано, что погрешность измерения температуры и деформации с помощью АВБС и радиофотонного опроса существенно меньше (на два порядка), чем при использовании классических ВБР и оптоэлектронных интеррогаторов.

С учётом анализа научно-технической информации показано, что наиболее простым и технологичным оптическим методом одновременного контроля деформации и температуры среды на основе ВБР в настоящее время является метод двух волокон [9]. Метод заключается в использовании двух волокон с записанными в них ВБР для компенсации температуры, обладающих существенно различной чувствительностью к температуре и деформации или к одному из указанных параметров за счёт различных легирующих добавок, добавленных в волокна или различных методов записи ВБР. В нашем случае следует исследовать применимость метода для АВБС, встроенных в ТРПКМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Alhussein A. N. D. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies / A. N. D. Alhussein, M. R. T. M. Qaid, T. Agliullin et all. // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 7. – P. 2289. – DOI: 10.3390/s25072289.
2. Kim S. S. Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress / S. S. Kim, H. Murayama, K. Kageyama et all. // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. – 2012. – Vol. 43. – P. 1197–1202.
3. Khoun L. Investigation of process-induced strains development by fibre Bragg grating sensors in resin transfer moulded composites / L. Khoun, de Oliveira R., V. Michaud, P. Hubert // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. – 2011. – Vol. 42. – P. 274–282.
4. O'Dwyer M. J. Relating the state of cure to the real-time internal strain development in a curing composite using in-fibre Bragg gratings and dielectric sensors / M. J. O'Dwyer, G. M. Maistros, S. W. James et all. // Measurement Science and Technology. – 1998. – Vol. 9. – P. 1153–1158.
5. Schubel P. J. Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades / P. J. Schubel, R. J. Crossley, E. K. G. Boateng, J. R. Hutchinson // Renewable Energy.– 2013. – Vol. 51. – P. 113–123.
6. Morozov O. G. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O. G. Morozov, A. J. Sakhabutdinov // Computer Optics. – 2019. – Vol. 43, № 4. – P. 535–543. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.

7. Agliullin T. Overview of addressed fiber Bragg structures' development / T. Agliullin, G. Il'in, A. Kuznetsov, R. Misbakhov et all. // Photonics. – 2023. – Vol. 10, № 2. – P. 175. – DOI: 10.3390/photonics10020175.
8. Шагидуллин А. Р. Постановка задач проектирования волоконно-оптических комбинированных датчиков и многосенсорных систем для регионального мониторинга концентрации парниковых газов / А. Р. Шагидуллин, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов и др.// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 4 (52). – С. 52–67.
9. Fedotov M. Yu. Theoretical studies of temperature compensation of results of diagnostics of polymer composites using the method of two optical fibers / M. Yu. Fedotov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 59, № 10. – P. 1061–1073. – DOI: 10.1134/S1061830923700560.
10. Backmann V. An Edge-Filtered Optical Fiber Interrogator for Thermoplastic Polymer Analysis / V. Backmann, F. Dorner, K. Drechsler // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 6. – P. 3300. – DOI: 10.3390/s23063300.
11. Sampath U. In-Situ Cure Monitoring of Wind Turbine Blades by Using Fiber Bragg Grating Sensors and Fresnel Reflection Measurement / U. Sampath, H. Kim, D.-G. Kim, Y.-C. Kim, M. Song // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 18229–18238. – DOI: 10.3390/s150818229.
12. Li C. Fiber-optic composite cure sensor: Monitoring the curing process of composite material based on intensity modulation / C. Li, M. Cao, R. Wang, Z. Wang et al. // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 63. – P. 1749–1758.
13. Wang P. Monitoring the resin infusion manufacturing process under industrial environment using distributed sensors / P. Wang, J. Molimard, S. Drapier et all.// Journal of Composite Materials. – 2011. – Vol. 46. – P. 691–706.
14. Ciddor P. E. Refractive Index of Air: New Equations for the Visible and near Infrared / P.E. Ciddor // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35. – P. 1566.
15. Juelich F. Determination of the Effective Refractive Index of Various Single Mode Fibres for Fibre Bragg Grating Sensor Applications / F. Juelich, J. Roths // Proceedings OPTO, 2009. – 2009. – P. 119–124.
16. Waxler R. M. The Effect of Temperature and Pressure on the Refractive Index of Some Oxide Glasses / R. M. Waxler, G. W. Cleek // Journal of Research of the National Bureau of Standards Sect. A Phys. Chem. – 1973. – Vol. 77. – P. 755.
17. Brückner R. Properties and Structure of Vitreous Silica. I / R. Brückner // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1970. – Vol. 5. – P. 123–175.
18. Jewell J. M. Thermooptic Coefficients of Some Standard Reference Material Glasses /J. M. Jewell // Journal of the American Ceramic Society. – 1991. – Vol. 74. – P. 1689–1691.
19. Tan C. Z. Temperature Dependence of Refractive Index of Glassy SiO2 in the Infrared Wavelength Range / C. Z. Tan, J. Arndt // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2000. – Vol. 61. – P. 1315–1320.
20. Müller U. Temperature Modulated Optical Refractometry: A Quasi-Isothermal Method to Determine the Dynamic Volume Expansion Coefficient / U. Müller, M. Philipp, M. Thomassey et all. // Thermochimica Acta. – 2013. – Vol. 555. – P. 17–22.
21. Васильев С. А. Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления и их применения / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, Е. М. Дианов // Фотон-Экспресс. – Наука. – 2004. – № 6. – С. 163–183.
22. Rao Yun-Jiang. In-fibre Bragg grating sensors / Rao Yun-Jiang // Measurement Science and Technology. – 1997. – Vol. 8. – P. 355–375.
23. Нуреев И. И. Пассивная волоконно-оптическая квазираспределённая сенсорная сеть контроля уровня воды в дискретных точках резервуара с адресным мультиплексированием / И. И. Нуреев, А. Д. Проскуряков, Н. Д. Смирнов, А. А. Садыков, А. Н. Леонтьев,

Н. А. Маркина, А. А. Кузнецов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 1 (61). – С. 77–90.
24. Морозов О. Г. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров / О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, Р. Р. Самигуллин, А. С. Шакиров, А. Р. Насыбуллин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. –2012. – № 1 (15). – С. 67–74.
25. Морозов Г. А. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин, Р. Р. Самигуллин, А. С. Шакиров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1–2. – С. 568–572.
26. Морозов Г. А. Формование изделий из радиопрозрачных материалов с использованием СВЧ-излучения / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1–2. – С. 573–576.
27. Морозов Г. А. Решение проблемы СВЧ-нагрева композиционных материалов /Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, В. И. Анфиногентов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 12–16.
28. Морозов Г. А. Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, Я. Н. Шангараева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 59–66.
29. Морозов Г. А. Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин, Р. Р. Самигуллин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 114–121.
30. Анфиногентов В. И. Выбор оптимальной структуры построения СВЧ-комплекса обработки термореактивных композитных материалов / В. И. Анфиногентов, Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин, Р. Р. Самигуллин, А. С. Шакиров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1–2. – С. 525–528.

THERMALLY COMPENSATED SERIAL-PARALLEL DUAL-CHANNEL FRESNEL-BRAGG SENSOR FOR MONITORING THE CURING OF FLAT SHEET THERMOSET COMPOSITES

O.G. Morozov, G.A. Morozov, J. Dahham, I. Alisherov, A.Z. Petrova, A.N. Sharafutdinov, E.V. Belov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. A thermally compensated series-parallel dual-channel Fresnel-Bragg sensor is proposed for monitoring the curing of flat sheet thermosetting polymer composite materials (TSPCMs). Monitoring in the first channel is based on measuring the Fresnel reflectivity at the optical fiber/epoxy resin interface during probing with dual-frequency laser radiation generated in a phased two-component addressed fiber Bragg structure (AFBS). The refractive index of the epoxy resin changes at different stages of curing, resulting in a change in the Fresnel reflectivity. The curing state is determined by monitoring the change in reflected intensity at the beat frequency of the AFBS components. The phased AFBS also serves as a thermometer for temperature compensation in the first channel. Using two wavelength AFBS in the second channel helps separate temperature-induced crosstalk effects from deformation effects caused by resin curing. This is achieved by placing one wavelength AFBS within the epoxy resin and the second outside it in close proximity, allowing for the temperature of the processed TSPCM to be

taken into account for temperature compensation in the second channel. A microwave photonic interrogator is used to process information in both channels for high accuracy AFBS interrogating. Experiments conducted in a resonator-horn microwave processing complex demonstrated the self-sufficiency of either channel. The goal is to use them comprehensively, provided the channels are constructed using different fiber types. This will allow for more effective separation of temperature-induced crosstalk effects from deformation effects, which is especially important when monitoring the curing of flat sheet TRPCMs while maintaining their shape.

Keywords: thermosetting polymer composite materials, Fresnel sensor, Bragg sensor, addressable fiber Bragg structure, temperature, deformation, temperature compensation, microwave photonic interrogator, microwave processing complex.

Статья представлена в редакцию 28 апреля 2026 г.