EDN: GKIZGJ DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.21.2.004
УДК 621.383 *2.2.6, 2.2.7, 2.2.8*

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК НА АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ С РАДИОФОТОННЫМ ОПРОСОМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

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

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

Аннотация. Данная статья ставит своей целью постановку задач для создания многофункционального датчика на адресных волоконных брэгговских структурах с радиофотонным опросом для мониторинга процесса изготовления термореактивных полимерных композитов в микроволновом технологическом комплексе. В первой части она носит обзорный характер с анализом приведенных данных по типам датчиков, используемых для мониторинга заливки связующего и отверждения композита с заключением о перспективности применения для решения этих задач волоконно-оптических датчиков. Полученные выводы служат дорожной картой для второй части, который включает в себя обзоры волоконно-оптических технологий, применяемых в производстве композитов и подбор прототипа, позволяющего одновременно контролировать процессы заливки и отверждения. Основным элементов прототипа является волоконная брэгговская решетка (ВБР). Известные преимущества ВБР нивелируются необходимостью применения для их опроса дорогостоящих оптико-электронных интеррогаторов с ограниченной точностью измерений. Предложен трехкомпонентный многофункциональный датчик для устранения этого недостатка, а также быстрого и точного опроса чувствительных элементов на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) с радиофотонным опросом. Пример применения датчика на АВБС в области мониторинга заполнения и отверждения ТРПКМ в микроволновом технологическом комплексе обсуждается в третьей части статьи. Оригинальность решения заключается в том, что разработанный датчик позволяет получать множество характеристик, критичных для мониторинга процесса изготовления ТРПКМ: заполнение смолой, измерение показателя преломления смолы, совместное измерение тепловых и механических деформаций на датчиках типа «сердцевина-оболочка-смола» и «сердцевина-смола как оболочка», а также получать их раздельное значение при использовании двух волоконного его компонента. Все компоненты представляют собой АВБС волнового типа.

Ключевые слова: термореактивные полимерные композитные материалы, адресная волоконная брэгговская структура, температура, деформация, термокомпенсация, метод двух волокон, радиофотонный интеррогатор, микроволновый технологический комплекс.

Введение

В настоящее время СВЧ-технологии находят все большее применение в процессах обработки различных материалов. Преимущественные качества технологии СВЧ-обработки позволяют осуществлять такие технологические операций как нагрев, сушка, вулканизация и девулканизация, упрочнение и деструкция материалов, ряд других процессов [1, 2], что делает их привлекательными для температурной обработки изделий из препрегов термореактивных полимерных композиционных материалов (ТРПКМ), позволяющей

наилучшим образом обеспечить равномерность температурной обработки заготовок изделий [3].

Любая композитная деталь, как правило, характеризуется определенными производственными затратами, качеством и поведением материала в процессе производства. В последние годы были достигнуты определенные результаты по каждому из этих направлений [4-10]. Естественно, промышленность проявляет большой интерес к минимизации производственных затрат. В производстве композитов себестоимость связана со временем цикла отверждения, адаптивностью к вариациям от партии к партии, воспроизводимостью и т. д.

В принципе, такие аспекты относятся к области оптимизации процесса. Качество конечной детали в значительной степени зависит от процессов заполнения и отверждения. Повышение качества – это область, работающая в направлении устранения дефектов. Наконец, механизмы, определяющие заполнение и отверждение, различаются в зависимости от параметров процесса (материалы, геометрия и термодинамические условия). Область, которая фокусируется на исследовании механизмов действия материала с учетом параметров процесса и теории, — это характеризация материалов. Эти области исследований различны, но при этом частично пересекаются; редко, когда исследование фокусируется только на одной из них. Поскольку мониторинг в режиме реального времени охватывает все три эти области, он выступает инструментом для их взаимосвязи.

Исследования, проведенные ранее, в направлении оценки различных методов мониторинга в режиме реального времени, довольно ограничены [4-10], но основным их результатом стало доказательство безусловной необходимости применения сенсорики в целях развития композитных технологий. Технологические прорывы, коммерциализация датчиков и стандартизация производства дали толчок внедрению промышленного мониторинга в режиме реального времени. Между тем, новые подходы к мониторингу композитных материалов постоянно пополняют накопленные знания.

Примером такой технологии является технология адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) с радиофотонным опросом. Среди технологий мониторинга реального времени различных изделий в ходе обработки волоконно-оптические технологий обладают несомненным преимуществом – отсутствием влияния ЭМП СВЧ-диапазона на волокно. В связи с этим в практике мониторинга изготовления ТРПКМ широко применяются волоконно-оптические датчики, в том числе волоконные брэгговские решетки (ВБР).

АВБС – это тип ВБР, спектральная характеристика которой имеет две узкие компоненты (отражательные или пропускающие) [11, 12]. При подключении АВБС к широкополосному оптическому источнику она формирует выходное излучение, состоящее из двух узкополосных частот, разница между которыми называется адресной частотой и относится к микроволновому диапазону (ГГц). Адресная частота инвариантна относительно сдвига центральной длины волны АВБС при воздействии деформации или изменения температуры. Поэтому адресная частота используется в качестве отличительного параметра, что позволяет опрашивать несколько АВБС, даже если их центральные длины волн совпадают. Использование АВБС значительно упрощает схему опроса по сравнению с оптоэлектронными методами, поскольку требует только широкополосного источника света, оптического фильтра с заданной частотной характеристикой и наклонным профилем и фотодетектора. В последнее время концепция АВБС была расширена и включила структуры с тремя или более спектральными компонентами, образующими две или более адресных частот, которые также известны как многоадресные волоконно-оптические структуры Брэгга. Увеличение количества адресных частот позволяет повысить точность определения центральной длины волны, а также расширить возможности систем мониторинга процессов и изделий в реальном времени.

Данная статья ставит своей целью постановку задач для создания многофункционального датчика на адресных волоконных брэгговских структурах с радиофотонным опросом для мониторинга процесса изготовления термореактивных полимерных композитов в микроволновом технологическом комплексе. В первой части она носит обзорный характер с анализом приведенных данных по типам датчиков, используемых для мониторинга заливки связующего и отверждения композита с заключением о перспективности применения для решения этих задач волоконно-оптических датчиков. Полученные выводы служат дорожной картой для второй части, которая включает в себя обзоры волоконно-оптических технологий, применяемых в производстве композитов и подбор прототипа, позволяющего одновременно контролировать процессы заливки и отверждения. Пример применения датчика на АВБС в области мониторинга заполнения и отверждения ТРПКМ в микроволновом технологическом комплексе обсуждается в третьей части статьи. Оригинальность полученного решения обсуждается в заключение.

1. Структурный анализ микроволнового технологического комплекса, реализующего технологии отверждения ТРПКМ

Вне зависимости от конкретного назначения, диапазона рабочих частот, объема, производительности и т.д., МВТК представляет собой некоторую систему, конечной целью которой является осуществление определенного электромагнитного воздействия на обрабатываемый объект. Основной функцией такой системы является генерация и излучение электромагнитных волн СВЧ-диапазона определенных частоты, интенсивности, параметров модуляции для создания в некотором объеме обрабатываемой среды ЭМП определенной интенсивности с заданным пространственно-временным и частотным распределением.

Исследования МВТК различного назначения показывают, что последние представляют собой сложные электронно-механические системы [3], структурные схемы которых могут быть представлены в виде нескольких подсистем (рис. 1), выполняющих выраженные специфические функции.

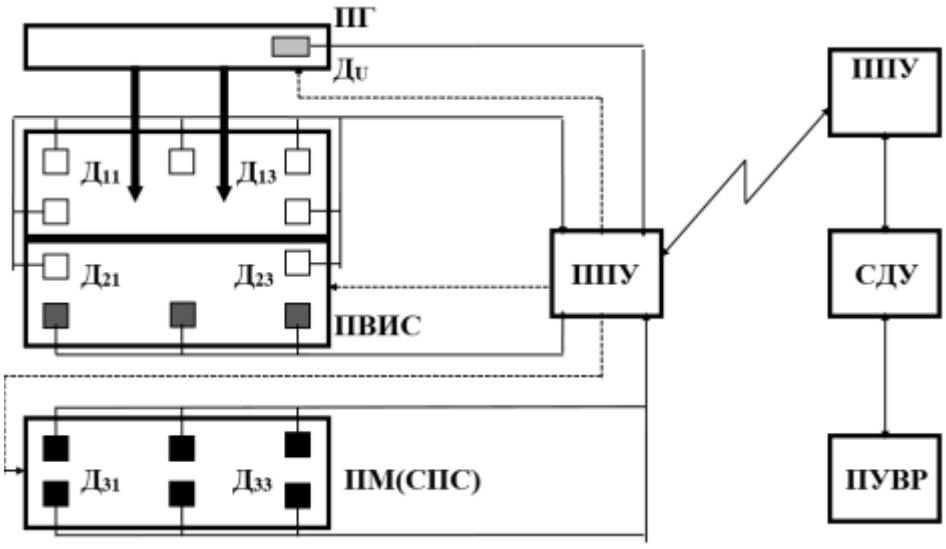


Рис. 1. Структурная схема произвольного МВТК

На рис. 1 обозначены: ПГ – подсистема генераторов СВЧ-диапазона (если установка содержит несколько генераторов, то указывают их число *N*); ПВИС – подсистема возбуждения-измерения ЭМП в среде (основное назначение данной подсистемы – преобразование энергии ЭМП в энергию теплового поля либо для низкоинтенсивных технологий в энергию

информационного поля, распределенную в объеме обрабатываемой среды); ППУ – приемно-передающее устройство, представляющее собой усилитель-преобразователь в случае проводного канала связи; ПУВР – подсистема управления и выработки решения; СДУ – системное шифрирующее/дешифрирующее устройство, осуществляющее преобразование аналогового сигнала в цифровой и наоборот; ПМ(СПС) – механическая подсистема (или система передвижения обрабатываемой среды); ДU – измерительный датчик параметров излучения (амплитуды, частоты, скважности и т.д.); $Д_{11}$ - $Д_{13}$ – измерительные датчики ЭМП в камере преобразования ПВИС; $Д_{21}$ - $Д_{23}$ – измерительные датчики ЭМП в обрабатываемой среде, расположенной в камере преобразования; $Д_{31}$ - $Д_{33}$ – измерительные датчики состояния механической системы передвижения среды.

Назначение, состав, реализуемые функции, а также тот факт, что в них генерируются, излучаются и используются электромагнитные волны СВЧ-диапазона, позволяют отнести МВТК к классу радиотехнических систем. Концепция системотехники состоит в представлении существующих или создаваемых сложных систем с помощью моделей и их исследований. Модель системы позволяет воспроизводить наблюдаемые процессы и их взаимосвязи, увязать воедино разнородные процессы, зависящие от входных данных.

В структуре нашего исследования акцент сделаем на физике и реализациях датчиков $Д_{21}$ - $Д_{23}$. В современных композитных материалах достижение заданного состояния отверждения смолы является критически важной задачей, поскольку завершение процесса полимеризации напрямую связано с механическими характеристиками конечного продукта [1-3]. Для учета влияния этой изменчивости необходимо контролировать процесс отверждения для каждой отдельной детали.

Преимуществами мониторинга процесса обработки композитов в режиме реального времени или на месте являются возможность мониторинга в реальном времени [13] и потенциал активного управления процессом по мере его протекания [14, 15]. При реализации RTM технологии армирующий материал укладывается на матрицу в виде заранее заготовленных выкроек. Затем укладывается пуансон, который прижимается к матрице при помощи прижимов. Смола подается в полость формы под рассчитанным давлением. Иногда, для облегчения прохода смолы через материал используется вакуум, который создается внутри формы. Как только смола пропитала весь армирующий материал, инжекцию останавливают и оставляют в форме до полного отверждения. Отверждение может проходить при обычной или повышенной температурах. В нашем случае повышенная температура создается с помощью облучения заготовки, пропитанной смолой с помощью СВЧ-излучения.

Дефекты заполнения (пористость, сухие участки и т. д.) или дефекты, вызванные отверждением (деградация, недостаточное отверждение и т. д.), считаются угрозой для структурной целостности композита. Ставится задача создания универсального сенсора, способного представлять информацию на обеих стадиях процесса.

Кратко рассмотрим существующие методы мониторинга заполнения и отверждения в режиме реального времени, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства ТРПКМ и методы их измерения на стадиях заполнения и отверждения

Свойства ТРПКМ	Метод измерения	Заполнение	Отверждение
Механические	Оптическая интерферометрия	∀	∀
	Ультразвук	∀	∀
Оптические	Оптическая рефрактометрия	∀	∀
	Спектрометрия	∀	∀
Термодинамические	Оптическая термометрия	∀	∀
	Термометрия	∀	∀
	Оптическая манометрия	∀	
	Манометрия	∀	

В табл. 1 представлена оценка технологий прямого измерения для стадий заполнения и отверждения в режиме реального времени, в частности, термопарных, ультразвуковых и волоконно-оптических датчиков. Каждый тип датчика отслеживает различные параметры, и для преобразования этих параметров в информацию, относящуюся к состоянию заполнения и отверждения материала, необходимо провести анализ разнородных данных. Как видно из табл. 1 оптические датчики применяются для оценки практически всех характеристик изготавливаемых материалов, поэтому они и выбраны предметом детального анализа.

2. Волоконно-оптические датчики, общие для применения в системах мониторинга заполнения и отверждения ТРПКМ

2.1. Датчики, определяющие механические свойства ТРПКМ. Волоконно-оптические интерферометры и ВБР. Из четырех типов волоконно-оптических интерферометров (Фабри-Перо, Маха-Цендера, Майкельсона, Саньяка) интерферометр Фабри-Перо (ИФП) является наиболее привлекательным для композитных применений, где многоточечное измерение с использованием одного волокна имеет первостепенное значение. Отражающие неоднородности вдоль сердцевины ИФП вызывают частичное отражение проходящего через него света. Все отражения вносят вклад в интерференционный сигнал, характеризующийся пиковой длиной волны [16]. Термическая деформация или внешние напряжения при заполнении связующим существенно влияют на расстояние между отражающими поверхностями и их показатель преломления. В результате деформация окружающей среды и температура вызывают сдвиг пиковой длины волны отраженного сигнала. Малый диаметр (обычно 125 мкм) и устойчивость к экстремальным условиям сделали ИФП подходящими для внедрения в композитные конструкции, где можно измерять термические, вызванные отверждением, или деформации при заполнении.

Публикаций с использованием ИФП для мониторинга стадий заполнения и отверждения ТРПКМ автором найдено мало. Наиболее часто упоминаемым конкурентом ИФП, является датчик на основе ВБР. Отражающие неоднородности в этом случае создаются путем периодической модуляции показателя преломления в одной или нескольких областях вдоль сердцевины оптического волокна [17]. Пиковая длина волны отражения или длина волны Брэгга (λ_B) зависит от расстояния между неоднородностями Λ и эффективного показателя преломления волокна n_{eff}:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \tag{1}$$

Изменение Λ, вызванные либо изменением осевой деформации $\Delta\varepsilon$, либо температуры ΔT, приводят к сдвигу пика Брэгга $\Delta\lambda_B$:

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

где P_{ij} – коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

При выполнении условий (2) получим новое значение длины волны λ'_B, как показано на рис. 2.

В [18] авторы внедрили распределенные ВБР в плетеные стекло-кевларовые/эпоксидные композиты, изготовленные методом RTM. Полученный сигнал напряжения стабилизировался только после затвердевания, иммобилизовавшего датчики. После отделения профиля напряжения от термических деформаций он был сопоставлен с результатами механических испытаний после изготовления, которые хорошо коррелировали с результатами, полученными с помощью ВБР.

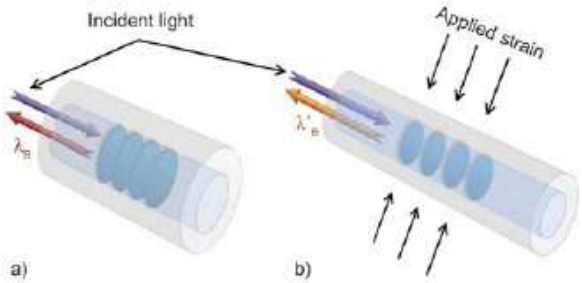


Рис. 2. Изменение длины волны Брэгга ВБР:
без деформации (a) и с приложением деформации (b)

В [13] с помощью ВБР определили профиль деформации углеродно-эпоксидных композитов в процессе RTM. Разделение ТРПКМ и оснастки определялось по разнице коэффициентов теплового расширения различных ВБР в композите. Полученные значения напряжения использовались для разработки моделирования напряжений. Модель, предполагающая фрикционный контакт на границе раздела деталь-инструмент, лучше всего согласуется с экспериментальными значениями.

В [14] исследовали использование внешних ИФП для мониторинга напряжений, возникающих в процессе отверждения. Датчики были вставлены в тканые углеродно-эпоксидные композиты, изготовленные с помощью VaRTM, и сравнивались с реологическими измерениями в автономном режиме, которые воспроизводили те же условия. Была обнаружена разница в 4 и 10 минут в точках гелеобразования и стеклования соответственно.

В [15] исследовали потенциал мониторинга отверждения с помощью встроенных ВБР в углеродно-эпоксидных композитах. Эксперименты с вакуумной инфузией показали, что сдвиги длины волны Брэгга и ослабление интенсивности выходного сигнала выявили особые точки процесса. На стадии нагрева температура стеклования определялась по изменению наклона пиковой интенсивности в зависимости от длины волны. На стадии охлаждения для расчета остаточных напряжений использовалось расщепление пиков, обусловленное неодноосными напряжениями.

2.2. Датчики, определяющие оптические свойства. Волоконно-оптические рефрактометры. Как обсуждалось в разделе 2.1, свет, проходящий через оптическое волокно, частично отражается при достижении границ раздела или неоднородностей. Рефрактометры используют границу раздела оптическое волокно-ТРПКМ для генерации измеряемого сигнала, поэтому необходим прямой контакт сердцевины оптического волокна с материалом. В случае удаления оболочки в определенной точке вдоль волокна (рис. 3,а), сигнал, принимаемый на выходном конце, имеет уменьшенную интенсивность по сравнению с падающим сигналом [19]. При заполнении удаленного участка смолой интенсивность меняется в зависимости от ее показателя преломления (ПП) в ходе отверждения.

Другой подход заключается в установлении контакта поперечного сечения одного из концов волокна с ТРПКМ. Другой конец служит одновременно входом и выходом. В конце выходным сигналом является отраженный сигнал от границы раздела материала и оптического волокна. Отраженный сигнал в этом случае подчиняется закону Френеля [20]

(рис. 3,б), согласно которому коэффициент отражения является функцией ПП материалов на границе раздела (3).

$$R_0 = \frac{\left(n_{\text{eff}} - n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2}{\left(n_{\text{eff}} + n_{\text{ТРПКМ}}\right)^2}, \tag{3}$$

В обоих случаях мониторинг отверждения основан на законе Лоренца-Лоренца (4), который связывает показатель преломления материала с его плотностью.

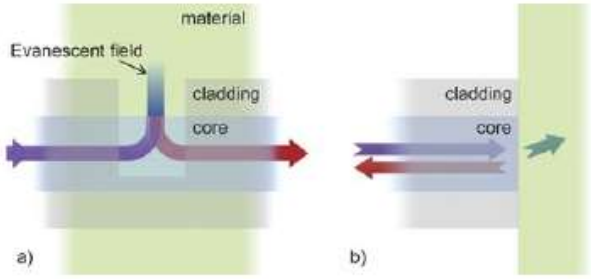


Рис. 3. Эванесцентный (а) и френелевский (б) волоконные рефрактометры: падающий свет (фиолетовый) отражается (красный) от осевой и поперечной границ раздела соответственно

$$\rho_{\text{ТРПКМ}} = \frac{1}{r}\frac{{n_{\text{ТРПКМ}}}^2 - 1}{{n_{\text{ТРПКМ}}}^2 + 2}, \tag{4}$$

В результате оптическое волокно с оголенным участком, вставленным в композит, может определять природу (фронт потока) или состояние (степень отверждения).

Важно, что при этом, как по длине волокна, так и на конце волокна в зоне удаления оболочки может быть записана ВБР с ее исключительными свойствами, что усилит эффективность использования рефрактометров.

В [21] использовали френелевский рефрактометр для мониторинга производства углеродно-эпоксидных композитов методом инфузии жидкой смолы. Мгновенное падение выходного сигнала указывало на прибытие смолы, в то время как стадия отверждения характеризовалась постепенным падением, за которым следовало постепенное увеличение. Сигнал не переставал увеличиваться после окончания отверждения из-за увеличения плотности, вызванного усадкой.

В [22] использовали эванесцентный рефрактометр для мониторинга стеклоэпоксидных композитов, изготовленных методом инфузии смолы под гибким инструментом (RIFT). При попадании смолы на короткий незащищенный участок наблюдалось внезапное падение интенсивности отраженного сигнала, что было подтверждено оптически. Эксперименты с длинным незащищенным участком в направлении потока показали экспоненциальное падение интенсивности по мере покрытия сердцевины эпоксидной смолой. Во время отверждения интенсивность отраженного сигнала постепенно падала и стабилизировалась в конце отверждения, что совпало с реологическим определением конца отверждения.

В [23] исследовали потенциал мониторинга отверждения при компрессионном формовании и автоклавировании с использованием эванесцентных рефрактометров. Во всех случаях выходной сигнал точно соответствовал численно ожидаемому поведению вязкости: падение (начало отверждения), повышение (середина отверждения) и стабилизация (конец отверждения).

В [24] разработали гибридный датчик ВБР – эванесцентный рефрактометр и использовали его для мониторинга потока в образцах из стекла/эпоксидной смолы, изготовленных

с помощью технологии вакуумной инфузии смолы (VERITy). Вытравленная область оптического волокна являлась чувствительным элементом, а область с решеткой находилась вне детали и служила встроенным преобразователем отраженного сигнала. Была разработана и экспериментально подтверждена многоточечная система обнаружения потока, состоящая из последовательных брэгговских областей и областей с удаленной оболочкой вдоль одного волокна; поступление смолы было успешно обнаружено на всех непокрытых областях.

В [25] использовали два типа рефрактометров, работающих на разных длинах волн, для мониторинга отверждения эпоксидной смолы. Измеренный показатель преломления быстро увеличивался после первоначального уменьшения, что указывает на корреляцию с вязкостью. Небольшие отклонения наблюдались между измерениями с помощью рефрактометра Френеля и рефрактометра на основе ВБР, главным образом из-за связанного эффекта деформации/температуры на последнем.

2.3. Датчики, определяющие термодинамические свойства ТРПКМ. Термометры на основе ВБР. Типичные приборы для измерения температуры в мониторинге композитных материалов включают термопары и инфракрасные термометры (либо точечные измерения, либо инфракрасную термографию), в то время как все более распространенным экспериментальным подходом является использование ВБР с встроенным в материал оптическим волокном и термокомпенсацией. ВБР с термокомпенсацией определяют температуру по сдвигу длины волны (см. разд. 2.1), вызванному только тепловыми деформациями, в отличие от типичных ВБР, измерение которых включает как кинематические, так и тепловые составляющие деформации.

Температура является одним из наиболее влиятельных факторов в композитах, поскольку сшивание полимеров – это термически активированный процесс. Мера термического воздействия на полимеризацию часто выражается зависимостью вязкости η от температуры T при изменении до T_g по Уильямсу, Ланделу и Ферри (WLF) :

$$\log\left(\frac{\eta_T}{\eta_{T_g}}\right)=\frac{-17,44\left(T-T_g\right)}{51,6+\left(T-T_g\right)}. \qquad (5)$$

Вызванные теплом изменения вязкости определяют скорость и качество заполнения. Однако система нагрева определяет количество тепла, достигающего материала лишь до определенной степени. Плохая регулировка нагрева, теплоемкость/теплопроводность композита и экзотермическое тепло, выделяемое термореактивными матрицами, являются факторами, которые необходимо учитывать. Мониторинг температуры направлен на учет всех этих факторов при оптимизации нагрева детали.

В [26] создан датчик с двумя наложенными решетками – длинно-периодной и ВБР, записанными в одной и той же зоне волокна. Наложенные друг на друга решетки обеспечивают хорошее различение тепловых и кинематических деформаций. Для проверки точности определения температуры датчик был использован в процессе пропитки жидкой смолой образца ТРПКМ. Температура, зарегистрированная во время отверждения, незначительно отличалась от параллельных измерений термопар.

В [27] создали ВБР в двух оптических волокнах с различными легирующими добавками в сердцевине и соединили их последовательно без зазора. Полученный чувствительный элемент эффективно различает термические и кинематические деформации. Эта способность была проверена путем встраивания датчика в композит из кевлара и эпоксидной смолы с микропроволоками из сплава с памятью формы (SMA). Было отмечено очень хо-

рошее соответствие с сравнительными измерениями термопар во время отверждения. Постполимеризационная активация SMA вызывала сокращения, которые измерялись датчиком и хорошо согласовались с теоретически ожидаемыми значениями.

2.4. Выводы по разделу. Анализируя информацию разделов 2.1-2.3 можно выделить как наиболее перспективное решение [25] и [27] комплексный датчик на основе эванесцентного рефрактометра, полностью покрытой ВБР [25] и ВБР, выполненной на двух волокнах с различными допантами [28].

Усиление потенциала такого решения может быть достигнуто с помощью применения современных технологий. Покажем это на примере технологии АВБС с радиофотонным опросом, заменяющей технологию ВБР с дорогим оптоэлектронным интеррогатором.

3. Трехкомпонентный АВБС сенсор мониторинга заполнения и отверждения ТРПКМ

На рис. 4 показан трехкомпонентный АВБС сенсор для мониторинга заполнения оснастки связующим и дальнейшего отверждения ТРПКМ.

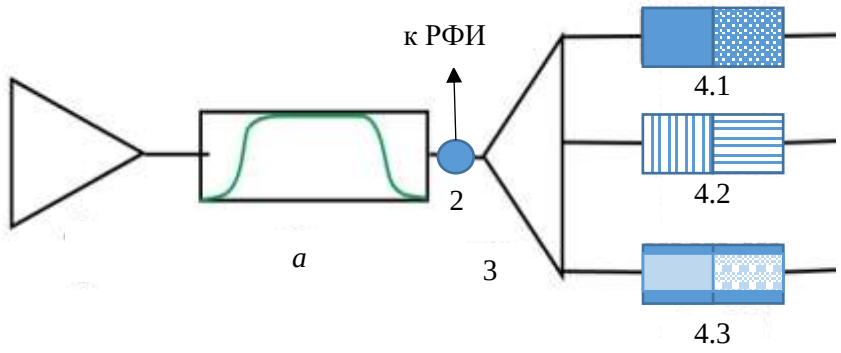


Рис. 4. Трехкомпонентный АВБС сенсор:
1 – лазер; 2 – циркулятор; 3 – разветвитель 1×3; 4.1 – двухкомпонентная классическая АВБС; 4.2 – двухкомпонентная АВБС с компонентами из разных волокон; 4.3 - двухкомпонентная классическая АВБС с вытравленной оболочкой; вставка *a* – спектр излучения для зондирования АВБС; РФИ – радиофотонный интеррогатор [29]

На рис. 5 иллюстративно представлен спектр отраженных от АВБС 4.1-4.3 излучений.

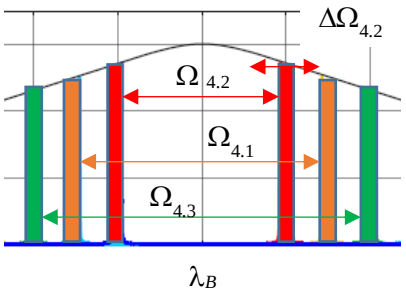


Рис. 5. Спектральное расположение АВБС 4.1-4.3

Все АВБС для сенсора имеют одинаковую центральную длину волну λ_B. Адресная частота АВБС4.3 $\Omega_{4.3}$ выбрана наибольшей, в силу травления адресная частота АВБС4.1 $\Omega_{4.1}$ будет меньше. Обе решетки выполнены в одном типе волокна. Адресная частота

АВБС4.2 $\Omega_{4.2}$ выбрана наименьшей в силу возможности ее изменения на величину $\Delta\Omega_{4.2}$ при изменении температуры. При этом ее измененное значение не должно выходить за пределы компонент АВБС4.3. Отметим что все компоненты АВБС 4.1-4.3, кроме правой компоненты АВБС 4.2, как выполненные на одном типе волокна будут смещаться одинаково при изменении температуры, причем их $\Delta\Omega \neq \Delta\Omega_{4.2}$.

Тогда, на входе РФИ получим

$$F(t) \sim \begin{pmatrix} A_{4.1}\cdot\sin(\omega_{4.1}\cdot t)+B_{4.1}\cdot\sin((\omega_{4.1}+\Omega_{4.1})\cdot t)+ \\ +A_{4.2}\cdot\sin(\omega_{4.2}\cdot t)+B_{4.2}\cdot\sin((\omega_{4.2}+\Omega_{4.2})\cdot t)+ \\ +A_{4.3}\cdot\sin(\omega_{4.3}\cdot t)+B_{4.3}\cdot\sin((\omega_{4.3}+\Omega_{4.3})\cdot t) \end{pmatrix}^2, \quad (6)$$

по аналогии с [30] получим

$$A_i = \left(\sqrt{(u\Omega_i)^2+4D_i}-u\Omega_i\right)\Big/2 \geq 0,\ i=\overline{4.1,4.3}, \quad (7.1)$$

$$B_i = \left(\sqrt{(u\Omega_i)^2+4D_i}+u\Omega_i\right)\Big/2 \geq 0,\ i=\overline{4.1,4.3}, \quad (7.2)$$

где A_i, B_i – амплитуды компонент АВБС$_i$; ω_i – частота компоненты A_i.

Таким образом, задача нахождения амплитуд всех частотных составляющих и их амплитуд для измерительной системы с тремя АВБС решается полностью. Зная величины амплитуд, можно определить и центральную длину волн λ_B или вычислить коэффициент модуляции, и определить их положение, исходя из величины коэффициента модуляции.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. В случае изменения температуры все компоненты сдвигаются равномерно, кроме компоненты $B_{4.2}$, которая может занять произвольное положение по отношению к другим компонентам в силу отличного коэффициента теплового расширения волокна, в котором она записана. Тогда выражения (7.1) и (7.2) работают только для АВБС4.1 и АВБС4.3. На рис. 6, *а-в* приведены спектральные характеристики оптического излучения на входе ФП после наклонного фильтра РФИ для трех значений центральной длины волны λ_B АВБС: 1556,18 (начальная), 1556,22 (залив смолы) и 1556,26 (нагрев) нм.

На них видно изменение амплитуд адресных составляющих оптического результирующего сигнала перед фотоприемником при смещении АВБС4.3 по центральной длине волны. На результирующем спектре электрического сигнала видно увеличение амплитуды колебаний биений на адресной частоте 6,25 ГГц при изменении стадий изготовления ТРПКМ: – 4.09 дБм (рис. 6, *г*), – 2.56 дБм (рис. 6, *д*), – 1.06 дБм (рис. 6, *е*).

Итоговая зависимость изменений температуры АВБС4.3 в диапазоне нагрева от 22 до 30 °С от центральной длины волны λ_B приведена на рис. 7. Она является линейной зависимостью коэффициента модуляции биений на адресной частоте и качественно отражает измерительную характеристику для сенсора.

Полученные результаты хорошо согласуются с теоретической моделью, а выводы, которые можно сделать на основе результатов эксперимента, подтверждают возможность использования АВБС и методики их адресного опроса в реальных системах мониторинга процесса ТРПКМ в процессе заливки и отверждения в реальном масштабе времени.

Пример 2. Процесс поиска значений для компонент АВБС4.2, должен быть произведен с допущением, что компонента $A_{4.2}$ нам известна, а $B_{4.2}$ должно определить. Ее смещение при заливке и нагреве изменяется по другому закону, а разностная частота изменилась. Если компонента $B_{4.2}$ попадет между компонентами $B_{4.1}$ и $B_{4.3}$, так что разница частот

между $B_{4.1}$ и $B_{4.2}$ составит 0,6 ГГц, то можно определить значение ее частоты по частотам биений между указанными частотами [31].

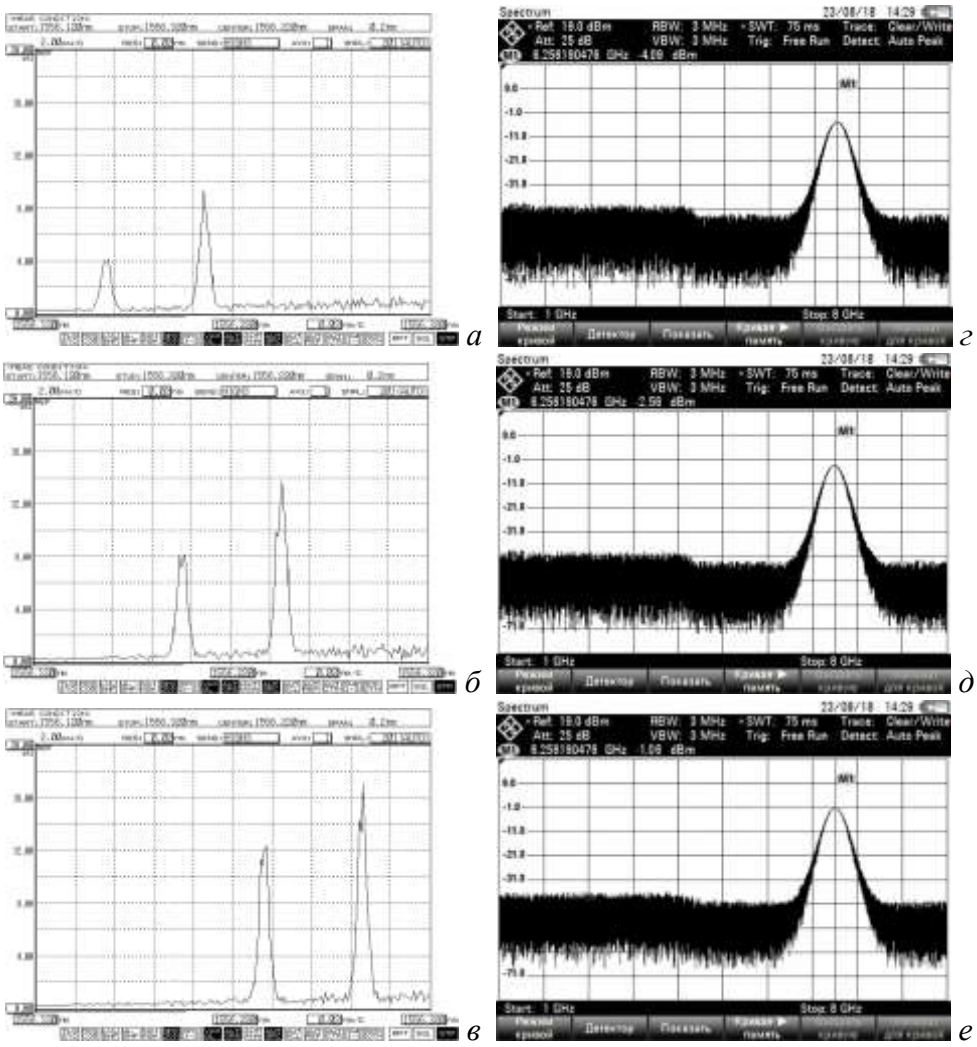


Рис. 6. Спектральные характеристики оптического излучения на входе ФП (а-в) и радиосигнала на адресной частоте на выходе ФП при изменении центральной длины волны λ_B для значений 1556,18 нм (*а* и *г*), 1556,22 нм (*б* и *д*), 1556,26 нм (*в* и *е*)

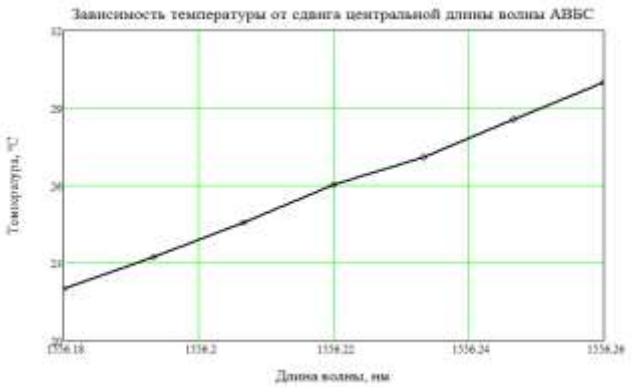


Рис.7. Зависимость температуры АВБС4.3 от смещения центральной длины волны λ_B

При условии разностной частоты между компонентами $B_{4.1}$ и $B_{4.3}$ равной 2 ГГц на выходе фотоприемника в результате фотосмешения будут формироваться две частоты биений равные 0,6 ГГц и 1,4 ГГц соответственно, как показано на рис 8.

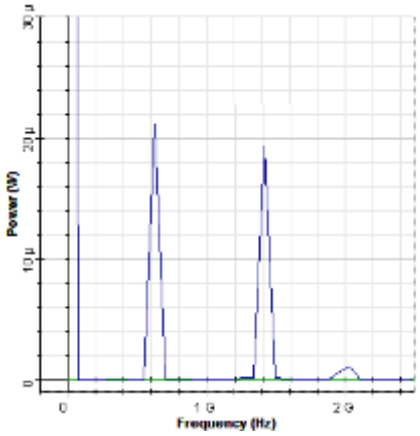


Рис. 8. Выходные спектры сигнала с фотоприемника при сдвиге компонент на 0,6 ГГц

Реакцию АВБС4.2 можно представить, как реакцию двух ВБР, с различной температурой и/или чувствительностью к деформации и объединить в линейную систему из двух уравнений, решение которой позволяет одновременно получить изменение температуры и деформацию:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B4.2(A)}/\lambda_{B4.2(A)} \\ \Delta\lambda_{B4.2(B)}/\lambda_{B4.2(B)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{T4.2(A)} & K_{\varepsilon 4.2(A)} \\ K_{T4.2(B)} & K_{\varepsilon 4.2(B)} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{pmatrix} = K^{-1}y. \tag{8}$$

где индексы A и B указывают на конкретные компоненты АВБС4.2, $\boldsymbol{K}$ – матрица коэффициентов 2 × 2, а $\boldsymbol{y}$ – вектор относительных сдвигов длины волны. Уравнение (8) можно записать в векторной форме как $\boldsymbol{x} = K^{-1}y$, где $\boldsymbol{x}$ — вектор, образованный компонентами температуры и деформации. Для эффективного различения вкладов температуры и деформации матрица коэффициентов $\boldsymbol{K}$ должна быть хорошо обусловлена.

Относительная ошибка δx в температуре и деформации связана с вектором изменения длины волны Брэгга $\delta\boldsymbol{y}$ следующим образом:

$$\frac{\|\delta x\|}{\|x\|} \le C(K)\frac{\|\delta y\|}{\|y\|}, \tag{9}$$

где $C(K) = \|K\|\|K\|^{-1}$ – число обусловленности матрицы коэффициентов $\boldsymbol{K}$. Для того чтобы уменьшить ошибку при одновременной оценке деформации и температуры, желательно малое число обусловленности.

Аналогично необходимо решить задачу для АВБС4.2 на стадии заливки, только в отношении деформации.

Пример 3. Особого внимания требует решение задачи для АВБС4.1 на стадии заливки. Основной принцип здесь заключается в том, что, когда смола достигает вытравленной зоны, происходит небольшая релаксация, приводящая к изменению деформации, которая регистрируется для АВБС4.1. Преимущество этой схемы заключается в ее высокой надежности, и эта же АВБС4.1 может быть использована для мониторинга поступления

смолы во время процесса инфузии, а затем и для оценки состояния конструкции во время эксплуатации.

Таким образом, представленный трехкомпонентный датчик является многофункциональным и перекрывает множество характеристик, критичных для мониторинга процесса изготовления ТРПКМ: заполнение смолой, ПП смолы, совместное измерение тепловых и механических деформаций на датчиках сердцевина-оболочка-смола и сердцевина- смола как оболочка, а также получать их раздельное значение при использовании двух волоконного его компонента. Такая многофункциональность, по нашему мнению, получена впервые.

Заключение

ВОД являются перспективными инструментами для измерения остаточных напряжений и мониторинга состояния ТРПКМ по сравнению с тензометрическими датчиками, а также чувствительны к изменениям потока смолы и заполнению формы во время процессов инфузии. Оптические волокна также могут использоваться для идентификации событий поступления и потока смолы во время процесса инфузии путем мониторинга изменений световых сигналов по мере того, как длина волокна смачивается смолой. Наконец, можно контролировать процесс отверждения термореактивных полимеров. Хотя сигналы могут идентифицировать фазовые переходы в матрице, конкретная оценка степени отверждения во времени может отсутствовать. Кроме того, установлено, что волоконно-оптические датчики довольно чувствительны, как к процессу встраивания, заполнения, так и к процессу отверждения. В их ходе могут быть вызваны изгиб и сужение, что может негативно повлиять на качество информационного сигнала.

В настоящее время ВОД не могут обеспечить разработчиков качественным выходным сигналом и их количеством, отражающим необходимые для мониторинга характеристики для применения в производстве высококачественных композитных изделий. При применении СВЧ-технологий для изготовления ТРПКМ волоконно-оптические технологий обладают несомненным преимуществом мониторинга реального времени – отсутствием влияния ЭМП СВЧ-диапазона на волокно. В связи с этим в практике мониторинга изготовления ТРПКМ широко применяются волоконно-оптические датчики, в том числе волоконные брэгговские решетки (ВБР). Было предложено перейти от ВБР к АВБС и применять радиофотонные технологии.

В итоге, разработан трехкомпонентный датчик на АВБС, который является многофункциональным и перекрывает множество характеристик, критичных для мониторинга процесса изготовления ТРПКМ: заполнение смолой, ПП смолы, совместное измерение тепловых и механических деформаций на датчиках сердцевина-оболочка-смола и сердцевина-смола как оболочка, а также получать их раздельное значение при использовании двух волоконного его компонента. Показаны алгоритмы обработки информации и получения указанных характеристик ТРПКМ в реальном времени с помощью радиофотонного интеррогатора. Такая многофункциональность, по нашему мнению, получена впервые.

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

Список литературы

1. Микроволновые промышленные, научные и медицинские применения / под ред. Э. М. Гранта. — Бостон; Лондон: Larstin Arteda House, 1992.
2. Морозов Г. А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные достижения и новые подходы / Г. А. Морозов // Антенны. – 1998. – Вып. 1 (40). – С. 88–97.
3. Низкоинтенсивные микроволновые технологии: методы и аппаратура / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, Н. Е. Стахова, В. В. Степанов, Ю. Е. Седельников; под ред. Г. А. Морозова, Ю. Е. Седельникова. — М. : Радио и связь, 2003. — 128 с. : ил.
4. Морозов О. Г. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров / О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, Р. Р. Самигуллин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1 (15). – С. 67–74.
5. Морозов Г. А. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1–2. – С. 568–572.
6. 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 РАН. – 2012. – Т. 14, № 1–2. – С. 573–576.
7. Морозов Г. А. Решение проблемы СВЧ-нагрева композиционных материалов / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, В. И. Анфиногентов, Д. А. Веденькин, С. В. Смирнов, С. Р. Ганиева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19, № 3. –С. 12–16.
8. 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.
9. Морозов Г. А. Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, А. Р. Насыбуллин и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 114–121.
10. 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.
11. 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.
12. Agliullin T. Overview of addressed fiber Bragg structures' development / T. Agliullin, G. Il'in, A. Kuznetsov, R. Misbakhov et al. // Photonics. – 2023. – Vol. 10, № 2. – P. 175. DOI: 10.3390/photonics10020175.
13. Khoun L. Investigation of process-induced strains development by fibre Bragg grating sensors in resin transfer moulded composites / L. Khoun, R. D. de Oliveira, V. Michaud, P. Hubert // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2011. – Vol. 42. – P. 274–282. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.11.013.
14. Archer E. Internal strain measurement and cure monitoring of 3D angle interlock woven carbon fibre composites / E. Archer, J. Broderick, A. T. McIlhagger // Compos. Part B Eng. – 2014. – Vol. 56. – P. 424–430. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.067.

15. Tsai L. Application of the embedded optical fiber Bragg grating sensors in curing monitoring of Gr/Epoxy laminated composites / L. Tsai, T.-C. Cheng, C.-L Lin., C.-C. Chiang, N. G. Meyendorf, K. J. Peters, W. Ecke // Proc. SPIE 7293, Smart Structures and Materials/Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. – 2009. – P. 729307–729308. DOI: 10.1117/12.817520.
16. Blazejewski W. Application of optical fibre sensors to measuring the mechanical properties of composite materials and structures / W. Blazejewski, P. Gąsior, J. Kaleta // Advances in Composite Materials – Ecodesign and Analysis / ed. by B. Attaf. — Rijeka : InTech, 2011. — P. 221–246. DOI: 10.5772/13954.
17. Lee B. H. Interferometric fiber optic sensors / Lee B. H., Kim Y. H., Park K. S. et al. // Sensors. – 2012. – Vol. 12, № 3. – P. 2467–2486. DOI: 10.3390/s120302467.
18. Jung K. Cure monitoring and internal strain measurement of 3-D hybrid braided composites using fiber Bragg grating sensor / K. Jung, T. J. Kang // J. Compos. Mater. – 2007. – Vol. 41, № 12. – P. 1499–1519. DOI: 10.1177/0021998306068088.
19. Yu F., Yin S. Fiber Optic Sensors. — New York : Marcel Dekker, 2002.
20. Sharma K. K. Optics: Principles and Applications. — Amsterdam: Academic Press, 2006.
21. Wang P. Monitoring the resin infusion manufacturing process under industrial environment using distributed sensors / P. Wang, J. Molimard, S. Drapier, A.Vautrin, J. C. Minni // J. Compos. Mater. – 2012. – Vol. 46, № 6. – P. 691–706. DOI: 10.1177/0021998311410479.
22. Lekakou C. Optical fibre sensor for monitoring flow and resin curing in composites manufacturing / C. Lekakou, S. Cook, Y. Deng, T. W. Ang, G. T. Reed // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2006. – Vol. 37, № 6. – P. 934–938. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.03.002.
23. 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. // Compos. Sci. Technol. – 2003. – Vol. 63, № 12. – P. 1749–1758. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00118-0.
24. Gupta N. Fiber optic sensors for monitoring flow in vacuum enhanced resin infusion technology (VERITy) process / N. Gupta, R. Sundaram // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2009. – Vol. 40, № 6–7. P. 1065–1070. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.022.
25. Buggy S. J. Optical fibre grating refractometers for resin cure monitoring / S. J. Buggy, E. Chehura, S. W. James, R. P. Tatam // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2007. – Vol. 9, № 6. – P. S60–S65. DOI: 10.1088/1464-4258/9/6/S09.
26. Marin E. Liquid resin infusion process monitoring with superimposed fibre Bragg grating sensor / E. Marin, L. Robert, S. Triollet, Y. Ouerdane // Polym. Test. – 2012. – Vol. 31, № 8. – P. 1045–1052. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2012.07.018.
27. Yoon H.-J. In situ strain and temperature monitoring of adaptive composite materials /H.-J. Yoon, D. M. Costantini, H. G. Limberger, R. P. Salathé, C.-G. Kim, V. Michaud // J. Intell. Mater. Syst. Struct. – 2006. – Vol. 17, № 12. – P. 1059–1067. DOI: 10.1177/1045389X06064889.
28. 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 // Russ. J. Nondestruct. Test. – 2023. – Vol. 59, № 10. – P. 1061–1073. DOI: 10.1134/S1061830923700560.
29. 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. И. Нуреев, Ю. А. Тунакова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 4 (52). – С. 52–67.
30. Морозов О.Г. Термокомпенсированный последовательно-параллельный двухканальный датчик френелевско-брэгговского типа для мониторинга отверждения плоских ли-

стовых термореактивных композитов / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Д. Даххам, И. Алишеров, А.З. Петрова // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2026. – Т.6. - №2. EDN: AVWSZB.

31. Кувшинов Н. Е. Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона / Н. Е. Кувшинов, Р. Ш. Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, А. Р. Насыбуллин, А. Ж. Сахабутдинов, М. Ю. Застела, Б. А. Акишин, Ю. И. Чони // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3 (51). – С. 77–92.

A MULTIFUNCTIONAL SENSOR BASED ON ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES WITH RADIOPHOTONIC INTERROGATION FOR MONITORING THE MANUFACTURING PROCESS OF THERMOSET POLYMER COMPOSITES IN A MICROWAVE TECHNOLOGICAL COMPLEX

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

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

Annotation. This article aims to formulate the tasks for creating a multifunctional sensor based on addressed fiber Bragg structures (AFBS) with radiophotonic interrogation for monitoring the manufacturing process of thermosetting polymer composites in a microwave processing complex. The first part provides an overview, analyzing the available data on the types of sensors used to monitor binder pouring and composite curing, and concluding on the potential of using fiber optic sensors for solving these problems. The obtained conclusions serve as a roadmap for the second part, which includes reviews of fiber optic technologies used in composite production and the selection of a prototype capable of simultaneously monitoring the pouring and curing processes. The key element of the prototype is a fiber Bragg grating (FBG). The known advantages of FBGs are offset by the need to use expensive optoelectronic interrogators with limited measurement accuracy for their interrogation. A three-component multifunctional sensor is proposed to address this drawback, as well as to quickly and accurately interrogate sensitive elements based on AFBS with radiophotonic interrogation. An example of the AFBS sensor's application in monitoring the filling and curing of TRPCMs in a microwave processing complex is discussed in the third part of the article. The uniqueness of this solution lies in the sensor's ability to obtain multiple characteristics critical for monitoring the TRPCM manufacturing process: resin filling, resin refractive index measurement, combined measurement of thermal and mechanical strains using core-shell-resin and core-resin-as-shell sensors, and separate measurements of these strains using two fiber components. All components are wave-type AFBSs.

Keywords: thermosetting polymer composite materials, targeted fiber Bragg structure, temperature, deformation, thermal compensation, two-fiber method, microwave photonic interrogator, microwave technological complex.

Статья представлена в редакцию 30 апреля 2026 г.