

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПАТЕНТОВ О МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Бочкарев С.В., Кудрявцев В.В.*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь*

**Ключевые слова:** композит, неразрушающий контроль, ультразвуковое тестирование.

**Аннотация.** При создании композитов высокой прочности и высокого качества необходим выбор соответствующего метода контроля, диагностики и испытаний. Показаны методы выявления повреждений с использованием полимерного покрытия, в которое введены микрокапсулы с красящим веществом, механохромные, механолюминесцентные композиции. Для обнаружения дефектов композиционного армирования рассмотрены методы теплового контроля и теплового нагружения с последующей регистрацией поля перемещений. Для повышения точности и достоверности определения пористости, плотности, прочности при сдвиге и сжатии предлагается размещать оптические волокна с брэгговскими решетками в слоях конструкции из полимерных композитных материалов в процессе ее изготовления.

## ANALYTICAL REVIEW OF PATENTS ON METHODS OF CONTROL OF COMPOSITE MATERIALS

*Bochkarev S.V., Kydriavcev V.V.*

*Perm National Research Polytechnic University, Perm*

**Keywords:** composite, nondestructive control, ultrasound testing.

**Abstract.** When creating composites of high strength and high quality, it is necessary to choose the appropriate method of control, diagnosis and testing. Methods of damage detection using a polymer coating, in which microcapsules with a coloring substance, mechanochromic, mechanoluminescent compositions are introduced, are shown. To detect defects in composite reinforcement, methods of thermal control and thermal loading with subsequent registration of the displacement field are considered. To increase the accuracy and reliability of determining porosity, density, shear strength and compression, it is proposed to place optical fibers with Bragg gratings in layers of a structure made of polymer composite materials during its manufacture.

Решая проблему повышения прочности и качества при изготовлении изделий из композиционных материалов (КМ), необходимо решать задачу разработки методов их контроля, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации.

Известно, что в процессе производства и эксплуатации конструкций из полимерных композиционных материалов возможно появление малозаметных ударных повреждений в виде вмятин, сколов, сопровождающиеся расслоением и растрескиванием внутренних слоев композита, которые нельзя обнаружить визуально. В этих областях происходит существенное ослабление или исчезновение адгезии между соседними слоями полимерных композитных материалов (ПКМ), что приводит к значительному ухудшению прочностных и эксплуатационных характеристик.

В [1] для обнаружения малозаметных повреждений предлагается на подготовленную поверхность конструкции наносить люминесцентное покрытие

на основе полимерной композиции связующего, которая под воздействием ультрафиолетового излучения с длиной волны  $360\div 365$  нм изменяет цвет, видимый глазом, т.е. поврежденные места конструкции будут иметь цветовую окраску, отличную от цвета защитного слоя покрытия.

В [2] для выявления повреждений на стадии их возникновения используют полимерное покрытие, выступающее в роли датчика. В качестве датчика используют полимерный материал, в который введены микрокапсулы с красящим веществом и который наносят на участок вероятного возникновения повреждения. Наличие и/или развитие повреждения определяют визуально по изменению цвета датчика.

В [3] предлагается для обнаружения повреждений наносить покрытия на основе механохромной композиции на поверхность конструкции. Нагрузка приводит к удлинению или механическому разрушению механофора, который указывает на поврежденные участки, вызывая изменение цвета материала.

Недостатком рассмотренных способов обнаружения повреждений является недостаточная чувствительность к ударам с малой энергией.

Известен способ [4] обнаружения и визуализации повреждений конструкции, который заключается в том, что на поверхность исследуемого объекта наносят высокочувствительный к механическим деформациям слой механолюминесцирующего в видимой области спектра материал, интенсивность свечения которого пропорциональна величине деформации объекта.

Известен способ [5] обнаружения ударных повреждений с помощью датчика, содержащего в своей конструкции механолюминесцентное покрытие, излучающее световой импульс при возникновении ударного давления.

Использование ударного воздействия предложено в [6], в котором производят виброударное деформирование контролируемого материала или изделия посредством жесткого индентора и измеряют временные интервалы между двумя последовательными соударениями индентора с контролируемым материалом или изделием. Между двумя последовательными соударениями в установившемся режиме процесса виброударного деформирования судят о прочности полимерного материала или изделия.

Известен ряд способов обнаружения дефектов нарушения сплошности тепловым методом.

В [7] предлагается сканировать инфракрасным радиометром тепловое поле объекта контроля, в [8-11] используют метод для контроля надежности сложных пространственных конструкций из КМ, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации, пространственных сетчатых конструкций: отсеков космических аппаратов, ракетных двигателей, трубопроводов, герметичных сосудов и т.п.

Согласно данным способам контролируемое изделие подвергают тепловому излучению. Вследствие различия теплофизических характеристик областей нарушения сплошности (дефектов) и основного материала на поверхности контролируемого изделия образуется неоднородное температурное поле, которое регистрируется, например, тепловизионной техникой, обрабатывается и по результатам обработки и анализу выносятся заключение о наличии в материале внутренних дефектов.

Тепловой контроль используется в [12], в котором на исследуемую конструкцию воздействуют статической нагрузкой в течение времени ( $t_{st}$ ), регистрируют температурное поле поверхности конструкции ( $T_{st}(x,y)$ ) по истечении времени ( $t_{st}$ ). Для имитации нагрузки в реальных условиях эксплуатации ( $P(t)$ ) по истечении времени релаксации статической нагрузки, воздействуют динамической нагрузкой с фиксацией температурного поля поверхности конструкции ( $T_{din}(x,y)$ ). Анализируя температурные поля ( $T_{st}(x,y)$ ) и ( $T_{din}(x,y)$ ) определяют наличие внутренних остаточных напряжений исследуемой конструкции и внутренних дефектов.

Тепловое нагружение контролируемой поверхности за счет облучения контролируемой поверхности когерентным лазерным излучением с последующей регистрацией поля перемещений с целью обнаружения дефектов композиционного армирования по наличию аномалий интерференционных полос предлагается в [13].

Такие методы позволяет обнаруживать только нарушения сплошности достаточно больших размеров – в общем случае, сопоставимые по размерам с толщиной контролируемого изделия и зависящие от способа теплового нагружения. Контроль изделий по данным способам не позволяет обнаруживать микротрещины, «слипнутые» дефекты, дефекты малых размеров, поры и т.п.

В [14] предлагается методами неразрушающего контроля определять внутренние дефекты типа расслоение, возникших в процессе эксплуатации, затем измерять их площади и сравнивать величины площадей с предельно допустимым значением, рассчитанным из условия возникновения в зоне дефекта напряжений.

В [15] Предлагаются системы и методы обнаружения разрывных волокон в КМ. Используя ультразвуковой сигнал, регистрируют искажения амплитуды, которая указывает на разрыв волокна.

В [16] с помощью преобразователя возбуждают упругие колебания на поверхности контролируемого изделия и фиксируют отраженные эхосигналы этих колебаний. По параметрам принятого сигнала определяют пористость, плотность и механические свойства изделия.

Известен также способ получения фотоакустического изображения, реализуемый с использованием лазера [17] или с помощью ультразвука, включающее последовательно соединенные лазер, световод и лазерный оптико-акустический преобразователь, или используя результаты ультразвукового прохождения волн через композитный материал, используя программное обеспечение определяются физические атрибуты композита, такие, как массовая доля волокон, модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициента Пуассона.

Данные способы позволяют выявлять дефекты типа нарушения сплошности материала и не позволяет определять пористость, плотность и механические свойства ПКМ, так как нет достаточно тесной корреляционной связи с пористостью, плотностью и механическими свойствами материала и отсутствуют системы обработки принятого сигнала.

Для повышения точности и достоверности определения пористости, плотности, прочности при сдвиге и сжатии в [18] предлагается размещать оптические волокна с брэгговскими решетками послойно в слоях конструкции из ПКМ в процессе ее изготовления. В процессе нагружения изделия сравнивают

величины деформации и температуру с максимально допустимой величиной деформации и температуры. Измеряют зависимость величины напряжения и температуры на решетках от глубины их залегания в конструкции. Измеряют разность измеренных и эталонных зависимостей и на основании сравнения формируют заключение о надежности функционирования конструкции под действием силовых нагрузок и предельном ресурсе эксплуатации. По результатам измерения температуры вдоль оптических волокон локализуют места расположения концентраторов напряжений.

Аналогичное использование брэгговских решеток предлагается в [19]. В этом способе измеряют спектральное положение пиков брэгговских решеток после изготовления конструкции из композиционного материала, а затем определяют распределение механических и тепловых деформаций внутри конструкции композиционного материала путем решения системы уравнений, описывающих математическую модель конструкции и функциональных зависимостей, учитывающих значения реальных механических и тепловых деформаций и суммарных деформаций, полученных от смещения пиков брэгговских решеток.

Для повышения точности определения плотности деталей из высоконаполненных композитных материалов на основе октогена и обеспечение возможности в любой заданный период эксплуатации проведения контроля деталей различного размера и конфигурации в [20] предлагается возбуждать ультразвуковые волны в заданной зоне исследуемой детали с известной начальной плотностью  $\rho_0$ , измеряют время их распространения, повторно возбуждают ультразвуковые волны в этой же зоне в процессе эксплуатации, измеряют время их распространения, определяют относительное изменение времени распространения  $\delta t$  и рассчитывают плотность  $\rho$  исследуемой детали по следующему уравнению:  $\rho = \rho_0 \cdot [1 + (a \cdot \delta t + b)]$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

В [21] предлагается определять объемную среднюю ориентацию волокон в композитных волокнистых материалах на основе изменения скорости, с которой поляризованные электромагнитные сигналы распространяются через материал в зависимости от угла.

Характеристики распределения волокна, такие как объемная средняя ориентация волокон в композитных волокнистых материалах, могут быть оценены [22] на основе изменения скорости, с которой поляризованные электромагнитные сигналы распространяются через материал в зависимости от угла. Электромагнитное излучение может содержать терагерцовое излучение.

Актуальна задача автоматизированного контроля многослойных конструкций больших габаритов и, в особенности, определения принадлежности обнаруженного дефекта слоям изделия [23]. Контролируемое изделие сканируют ультразвуковыми преобразователями и с помощью ультразвукового дефектоскопа теневого контроля осуществляется обнаружение дефектов по всему пакету (по всей толщине) контролируемого изделия.

Ультразвуковой теневой метод используется для обеспечения автоматизированного ультразвукового теневого контроля изделий [24].

Качество композиционного материала может быть оценено, используя ультразвуковой сигнал, в котором искажения амплитуды указывает на разрыв волокна в многослойном материале.

В [25] предлагается использовать ультразвуковой дефектоскоп теневого контроля, датчик позиционирования, акустический дефектоскоп для осуществления метода свободных колебаний, пороговое устройство акустического дефектоскопа для осуществления метода свободных колебаний.

В [26] предлагается осуществлять контроль, как в процессе производства, так и в реальных условиях эксплуатации, в том числе в условиях нагрузки, определении участков пониженной прочности, дефектных участков (участков, не соответствующих нормативным документам), разработке рекомендаций для устранения дефектов или восстановления конструкции. Предложена сенсорная система для анализа свойств диэлектрического материала с помощью радиочастотного сигнала.

К улучшенным способам выявления разломов и расслоений относятся тепловидение и активная термография, осуществляющие мониторинг переноса тепловой энергии в ИК области спектра. Однако недостатком тепловидения является сложность интерпретации полученных результатов. К желательным бесконтактным технологиям относятся лазерная широкография (laser shearography) и голографическая интроскопия. Эти способы можно использовать для исследования внутреннего напряжения инспектируемого материала; однако их результаты искажаются из-за зависимости изображения от шумов, вызванных вибрацией.

Система контроля композитной конструкции [27], содержащая: оптическое волокно, расположенное в композитной конструкции; источник сигнала, связанный с оптическим волокном и выполненный с возможностью подачи сигналов на оптическое волокно для прохождения вдоль него; датчик, связанный с оптическим волокном и выполненный с возможностью регистрации сигналов, выходящих из оптического волокна.

Система данного варианта реализации также содержит датчик, выполненный с возможностью регистрации сигналов, имеющих нелинейный эффект после прохождения через оптическое волокно. Поскольку нелинейный эффект может быть быстро идентифицирован, система данного варианта реализации может надежным образом обнаруживать дефекты в композитном материале для облегчения дальнейшей проверки или ремонта. Например, дефекты, такие как отклонения в траектории волоконного жгута или композитном слое могут быть обнаружены в некоторых вариантах реализации вместе с местоположением таких дефектов.

Для оценки надежности и качества многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов на основе контроля толщины слоев используется способ вихретокового контроля [28]. Технический результат в части устройства достигается за счет того, что в устройство вихретокового контроля толщины композитных материалов на неметаллических подложках включен вихретоковый преобразователь с катушкой индуктивности.

Работа выполнена по гранту 18-29-18081.

### Список литературы

1. Патент №2645431 РФ. Способ обнаружения ударных повреждений конструкции / С.Л. Чернышев, М.Ч. Зиченков, С.А. Смотров, А.В. Смотров, В.М. Новоторцев, И.Л. Еременко, Ж.В. Доброхотова, А.М. Музафаров. – Заявка №2016147381 от 02.12.2016; опубл. 21.02.2018, Бюл. №6.
2. Патент №2439518 РФ. Способ диагностирования состояния конструкции / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – Заявка №2010146153/28 от 13.11.2010; опубл. 10.01.2012.
3. Patent № 8236914 US. Self-assessing mechanochromic materials / Stephanie L. Potisek, Douglas A. Davis, Scott R. White, Nancy R. Sottos, Jeffrey S. Moore. Pub. Aug 19, 2010.
4. Патент №2443975 РФ. Способ визуализации и контроля динамических деформаций поверхности и ударных нагрузок / А.Ф. Банишев, А.А. Банишев. – Заявка №201013668/28 от 02.09.2010; опубл. 27.02.2012.
5. Патент №2305847 РФ. Механолюминесцентный датчик удара / К.В. Татмышевский, З.Т.О. Рахманов, Н.Ю. Макарова, А.Г. Спажакин. – Заявка №2006105355/28 от 20.02.2006; опубл. 10.09.2007.
6. Патент №10472 ВУ. Способ неразрушающего контроля физико-механических свойств полимерного материала или изделия из полимерного материала / А.П. Крень, В.А. Рудницкий, А.О. Садовников – Заявка №2006096 от 02.07.2006; опубл. 30.10.2007.
7. Авторское свидетельство №1075131 СССР. Способ активного теплового контроля / Ширяев В.В., Вавилов В.П., Иванов А.И. – Заявка №3401103/18-25 от 01.03.82; опубл. 23.02.84. Бюл. №7.
8. Патент №2608491 РФ. Устройство теплового контроля качества композитных броневых преград / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская. – Заявка №2015151790 от 02.12.2015; опубл. 18.01.2017, Бюл. №2.
9. Патент №2616438 РФ. Способ теплового контроля композитных материалов / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская. – Заявка №2016119922 от 23.05.2016; опубл. 14.04.2017, Бюл. №11.
10. Патент №2648552 РФ. Способ контроля качества многослойных композитных броневых преград из ткани и устройство для его осуществления / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская. – Заявка №2017105670 от 20.02.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 9.
11. Патент №2663414 РФ. Способ контроля качества многослойных композитных броневых преград из ткани и устройство для его осуществления / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская. – Заявка №2017103555 от 10.04.2017; опубл. 06.08.2018, Бюл. № 22.
12. Патент №2383009 РФ. Способ теплового контроля остаточных напряжений и дефектов конструкций / О.Н. Будадин, В.В. Котельников. – Заявка №2007142919/28 от 22.11.2007; опубл. 27.02.2010.
13. Патент №2519843 РФ. Способ контроля внешнего композиционного армирования строительных конструкций / В.И. Кондращенко, А.Г. Кесарийский, И.Н. Минсадров. – Заявка №2013107644/28 от 21.02.2013; опубл. 20.06.2014, Бюл. №17.
14. Патент №2354964 РФ. Способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, использующий результаты неразрушающего контроля по обнаружению дефектов типа расслоение / М.Э. Францев, А.К. Сорокин. – Заявка №2007138064/28 от 16.10.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. №13.
15. Patent №7467052 US. Systems and methods for detecting discontinuous fibers in composite laminates / Vaccaro; Christopher M. December 16, 2008.
16. Патент №2214590 РФ. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления / Е.Н. Каблов, Г.М. Гуняев, А.А. Карабутов, В.В. Мурашов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова, А.Ф. Румянцев. – Заявка №2001135020/28 от 26.12.2001; опубл. 20.10.2003, Бюл. №29.
17. Patent №5408882 US. Ultrasonic device and method for non-destructive evaluation of polymer composites / McKinley; Barbara J., Matsumoto Dean S., Gilmore Robert S., McAlea Kevin P. Pub. April 25, 1995.

18. Патент №2633288 РФ. Способ диагностики надежности и предельного ресурса эксплуатации многослойных конструкций из композитных материалов / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская, В.О. Каледин – Заявка №2016126818 от 04.07.2016; опубл. 11.10.2017, Бюл. №29.
19. Патент №2427795 РФ. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала / Е.Н. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин. – Заявка №2009144602/28 от 03.12.2009; опубл. 27.08.2011.
20. Патент №2473894 РФ. Ультразвуковой способ контроля плотности в процессе эксплуатации деталей из высоконаполненных композитных материалов на основе октогена / Е.Н. Костюков, С.А. Вахмистров, А.Л. Михайлов, О.В. Колмаков. – Заявка №2011135108/28 от 22.08.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. №3.
21. Patent №20100219343 US. Methods and apparatus for determining fibre orientation/ Reid Matthew E. , Fedosejevs Robert. Pub. Sep 2, 2010.
22. Patent №7829855 US Methods and apparatus for determining fibre orientation/ Reid Matthew E. , Fedosejevs Robert. November 9, 2010.
23. Патент №2666159 РФ. Устройство комплексного автоматизированного неразрушающего контроля качества многослойных изделий / С.Р. Шишкин, О.А. Архипенков, А.С. Уланов, О.Н. Будадин., А.Н. Рыков. – Заявка №2015123009 от 16.06.2015; опубл. 06.09.2018, Бюл. №25.
24. Патент №145435 РФ. Устройство ультразвукового контроля крупногабаритных изделий / О.Н. Будадин, Ю.Г. Кутюрин, О.В. Юхацкова. – Заявка №2014102835/28 от 28.01.2014; опубл. 20.09.2014.
25. Patent № 20070118313 US. Systems and methods for detecting discontinuous fibers in composite laminates/ Vaccaro Christopher M. Pub. May 24, 2007.
26. Патент №2540411 РФ. Система и способ контроля композитных материалов с использованием радиочастотного отражения / К.Р. Лоуи, К. Джайн, Э.К. Стивенсон. – Заявка №2012151430/07 от 20.06.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. №4.
27. Патент №2641638 РФ. Композитная конструкция со встроенной измерительной системой / Дж..Х. Хант, Дж.Х. Белк. – Заявка №2013130320 от 03.07.2013; опубл. 18.01.2018, Бюл. №2.
28. Патент №2577037 РФ Способ вихретокового контроля толщины композитных материалов на неметаллических подложках и устройство для его осуществления / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, В.С. Щипцов. – Заявка №2014149748 от 09.12.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. №7.

Сведения об авторах:

*Кудрявцев Владимир Владимирович* – аспирант;  
*Бочкарев Сергей Васильевич* – д.т.н., профессор.