

В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Е. М. Кулешов, П. К. Нестеров, С. В. Мизрахи, М. С. Яновский
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА КАЧЕСТВО КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
 КВАЗИОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧАСТОТНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
 В СУБТЕРАГЕРЦЕВОЙ ОБЛАСТИ**

Квазиоптическая поляризационно-частотная рефлектометрия в субтерагерцевой (суб-ТГц) области частот рассмотрена с точки зрения ее применимости в качестве неразрушающего метода обнаружения подповерхностных повреждений композиционных материалов, используемых в современной аэрокосмической промышленности при создании прочных легковесовых конструкций с применением клеевых технологий. Настоящая работа касается исследования возможности обнаружения объемных увлажнений и термических повреждений структур из полимера, армированного волокнами углерода (CFRP), с целью оценки качества подготовки поверхности образцов CFRP перед склеиванием, используя квазиоптические лучеводные системы для поляризационных рефлектометрических измерений в суб-ТГц области частот (0,1...0,2 ТГц). Измерение амплитудно-частотных и поляризационных отражающих характеристик материалов на образцах CFRP показало, что термическое воздействие и объемное увлажнение приводят к изменению отражающих характеристик углепластика в этом диапазоне частот, что позволяет надеяться на использование этого метода при создании перспективных средств неразрушающего контроля и оценки качества подготовки поверхности CFRP композитов перед склеиванием. Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: квазиоптика, терагерцевый диапазон, поляризационно-частотная рефлектометрия, неразрушающий контроль, углепластика.

Композитные материалы, такие как стеклопластик, кевлар и углепластик, все чаще используются в качестве структурных компонентов в авиастроении благодаря их высокой прочности, малому весу и низкой коррозии по сравнению с другими конструкционными материалами. Это приводит к улучшению аэродинамических характеристик и снижению веса самолетов, существенной экономии горючего и, как следствие, к снижению вредных выбросов в атмосферу и уменьшению эксплуатационных расходов. Наряду с этим в современной аэрокосмической промышленности для создания различных конструкций из композитов все большее применение находят клеевые соединительные технологии взамен традиционных заклепочных. При этом на передний план выходят проблемы обеспечения гарантий качества таких клеевых соединений как в процессе их производства, так и в процессе эксплуатации. Ввиду того что традиционные методы неразрушающего контроля не позволяют выявить и оценить влияние различных поверхностных загрязнений и подповерхностных повреждений на качество подготовки склеиваемых поверхностей и прочность клеевых соединений композитов, важное значение приобретают поиски новых методов и средств диагностики таких структур.

Одним из перспективных методов неинвазивного контроля композитов является использование терагерцевого (ТГц) электромагнитного излучения (0,1...10 ТГц). Уникальные возможности для проникновения внутрь некоторых композитов и выявления дефектов, таких как пустоты, расслоения, механические или тепловые повреждения, предоставляет ТГц-излучение [1–5]. Это дает основание надеяться на создание новых не-

инвазивных, бесконтактных, неионизирующих методов оценки качества композиционных клеевых соединений и структур с помощью ТГц-технологий.

В ряде статей рассматривается распространение и рассеяние ТГц-излучения в случайных средах и композиционных материалах, а также приводятся результаты моделирования диэлектрических свойств композитов [6–8]. Авторы работы [5] методом ТГц-спектроскопии во временной области (TDS) изучили авиационные композиты из стекловолокна с различными формами повреждений. Результаты показали, что локальные термические повреждения обнаруживаются в стеклопластике по изменению в прошедшем через образец сигнале в диапазоне 0,2...1,2 ТГц. Однако, в отличие от стеклопластиков, диагностика повреждений в углепластике путем просвечивания образца в этом и других диапазонах радиочастот сильно затруднена из-за очень большого ослабления электромагнитных волн в полимере, армированном углепластиковым волокном (CFRP). Поэтому представляют интерес исследования метода суб-ТГц (0,1...0,2 ТГц) рефлектометрии для неразрушающего контроля качества поверхности углепластика, подготовленного под склеивание.

1. Метод. В настоящей статье мы рассматриваем суб-ТГц поляризационно-частотный рефлектометрический метод обнаружения некоторых типов подповерхностных повреждений композиционных материалов, изготовленных на основе материала CFRP, и представляем результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью разработанной квазиоптической (КО) радиоизмерительной аппаратуры. Метод заключается в сканировании исследуемой поверхности

образца сфокусированным волновым пучком при различных поляризациях и частотах и регистрации изменений комплексного коэффициента отражения и поляризации, вызванных появлением дефекта на границе раздела сред. Этот метод предполагает использование специальных КО радиоизмерительных трактов в сочетании с автоматическими анализаторами цепей (АНА) – скалярными (SNA) и векторными (VNA). При этом преимуществами квазиоптики являются очень малые потери энергии ТГц-волн в квазиоптических волноводах, возможность фокусировки или регулировки диаметра электромагнитного пучка в широких пределах, а также возможность работы с волнами любых видов поляризации. Возможность работы с произвольно поляризованными волнами открывает дополнительные пути для повышения чувствительности и оптимизации измерительных установок, а также для адаптации измерительных методик под конкретные виды дефектов. Использование автоматических анализаторов цепей позволяет осуществлять частотное сканирование исследуемых образцов с целью выявления особенностей, проявляющихся на их частотных характеристиках отражения или пропускания, вызванных наличием дефектов, для последующей оптимизации методики контроля дефектов по частоте.

2. Измерительная установка. На рис. 1 представлена схема реализации метода исследования поверхностных неоднородностей материалов средствами КО поляризационно-частотной рефлектометрии.

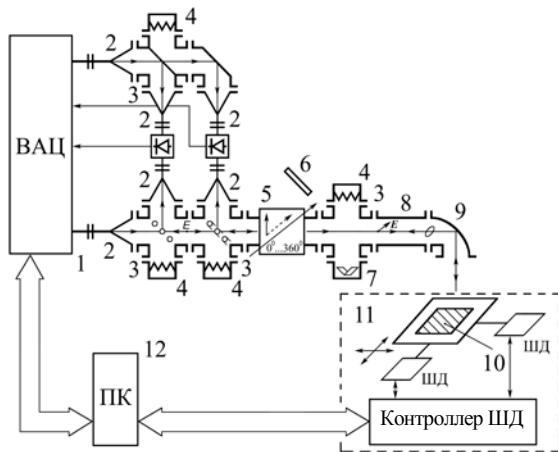


Рис. 1. Схема двухканальной КО измерительной установки для поляризационно-частотной рефлектометрии в суб-ТГц диапазоне частот

Измерения проводятся с помощью установки, представляющей собой комбинацию векторного анализатора цепей (ВАЦ) [9] и КО радиоизмерительного тракта, выполненного на ос-

нове полого диэлектрического лучевода (ПДЛ) [10, 11] и КО лучеводных компонентов [12].

Установка содержит: 1 – двухканальный ВАЦ R4402R диапазона 0,11÷0,17 ТГц; 2 – возбуждители ПДЛ; 3 – делители мощности; 4 – поглощающая нагрузка; 5 – трехзеркальный вращатель плоскости поляризации; 6 – отражающая зеркальная вставка; 7 – калибровочный двугранный отражатель; 8 – секции ПДЛ; 9 – фокусирующее зеркало; 10 – измерительная ячейка с исследуемым образцом; 11 – XY-сканер; 12 – персональный компьютер.

Установка обеспечивает возможность облучения исследуемой поверхности образца сфокусированным линейно поляризованным волновым пучком и регулирования его азимута поляризации. При каждом выбранном азимуте поляризации регистрируется картина амплитудного распределения коэффициента отражения по поверхности образца путем сканирования последнего в поле падающего пучка. Установка также позволяет измерять частотную характеристику коэффициента отражения одновременно для согласованной поляризации и для крессовой поляризации при облучении сфокусированным пучком любой выбранной области поверхности образца.

На рис. 2 представлена фотография экспериментальной установки для реализации метода.

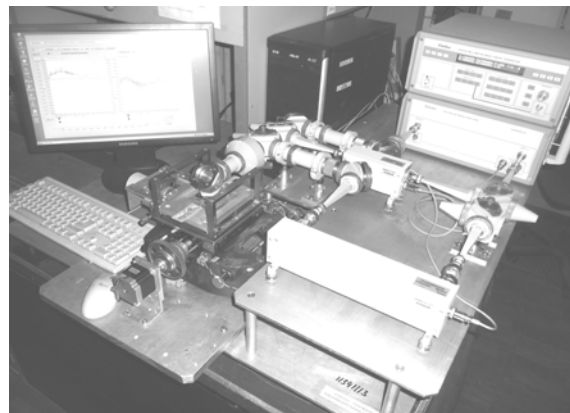


Рис. 2. Экспериментальная установка

3. Результаты исследований. Измерения выполнены при нулевом угле падения пучка на плоскость образца. На рис. 3 и 4 представлены результаты сканирования поверхности одного из образцов «чистого» углепластика, полученных из Института Фраунгофера (образец 6.9-4), сфокусированным линейно поляризованным волновым пучком диаметром около 5 мм при согласованном поляризационном приеме отраженной волны. Размеры области сканирования 19,5×26,5 мм, шаг сканирования – 0,375 мм вдоль строки, расстояние между строками – 0,29 мм, при этом время сканирования составляет около 25 мин.

На рис. 3, а и 4, а представлена амплитудная диаграмма коэффициента отражения на частотах 0,14 и 0,17 ТГц соответственно для случая, когда плоскость поляризации облучающей волны (направление ее электрического вектора) параллельна направлению углеродных волокон верхнего слоя образца. Это мы называем случаем *E*-поляризации.

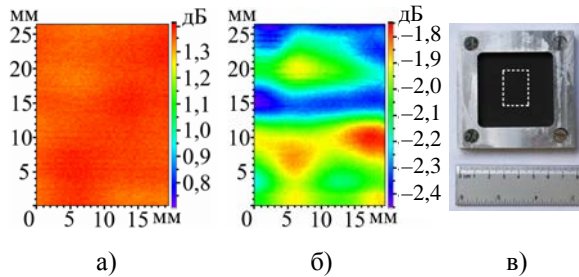


Рис. 3. Результаты сканирования поверхности образца «чистого» углепластика сфокусированным *E*- и *H*-поляризованным волновым пучком на частоте 0,14 ТГц при согласованном поляризационном приеме отраженной волны

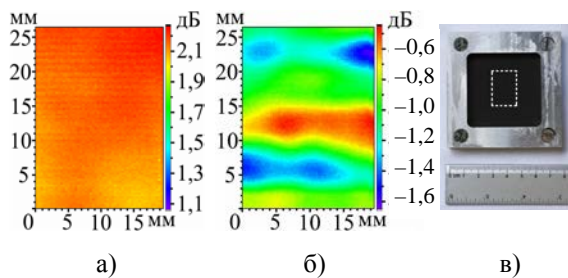


Рис. 4. Результаты сканирования поверхности образца «чистого» углепластика сфокусированным *E*- и *H*-поляризованным волновым пучком на частоте 0,17 ТГц при согласованном поляризационном приеме отраженной волны

На рис. 3, б и 4, б представлена такая же диаграмма, но для случая, когда плоскость поляризации облучающей волны ориентирована ортогонально направлению углеродных волокон верхнего слоя образца. Это мы называем случаем *H*-поляризации. В этом случае излучение, пройдя через углеродные волокна верхнего слоя образца и связующий их компаунд, отражается от углеродных волокон следующего за компаундом слоя, расположенных ортогонально волокнам верхнего слоя.

Точная настройка на *E*- и *H*-поляризацию осуществляется вращателем плоскости поляризации 5 (см. рис. 1) по минимальному уровню отраженного сигнала в канале крестовой поляризации, который в этом случае для *CFRP* образцов не превышает -20 дБ.

Разность между цветовыми уровнями отраженного сигнала от красного до фиолетового составляет около 0,7 дБ для 0,14 ТГц и 1,2 дБ для 0,17 ТГц. Здесь и в дальнейшем значения коэф-

фициента отражения даны относительно уровня излучения, отраженного от калибровочного двугранного отражателя 7, при помещенной в делитель 3 зеркальной отражающей вставке 6 (см. рис. 1).

На рис. 3, б и 4, б видно, что для случая *H*-поляризации хорошо проявляется подповерхностная неоднородная структура исследуемого материала, которая может создавать ложный фон, маскирующий дефекты при контроле поверхности образца.

На рис. 3, в и 4, в представлена фотография исследуемого образца углепластика, закрепленного в измерительной кассете, где пунктиром показана область сканирования.

4. Влияние влаги на качество поверхности углепластика, подготовленной под склеивание. Увлажнение образцов проводилось при температуре 70°C в течение 45 сут. Исследовались различные экземпляры образца 4.3-*UT* с размерами 50×50 мм, разрезанные пополам, при этом зона сканирования составляла $19,5\times 26,5$ мм. Каждый из образцов предварительно сканировался, когда обе половинки были сухими, чтобы получить исходную картину распределения отражения по поверхности образца. После этого одна из половинок (правая) увлажнялась и сканирование образца повторялось. Измерения производились на частотах 0,14 и 0,17 ТГц. Исследовались случаи 30, 75 и 100 % концентрации влаги в увлажняемой половинке. Для выдерживания требуемой концентрации влаги использовались насыщенные растворы солей в соответствии с таблицей.

| Концентрация влаги в образце, % | Насыщенный раствор соли | Концентрация солевого раствора, г/л | Набор веса, % |
|---------------------------------|---|-------------------------------------|---------------|
| 30 | $\text{MgCl}_2\times 6\text{H}_2\text{O}$ | 3670 | 0,065 |
| 75 | NaCl | 391 | 0,167 |
| 100 | дистиллированная вода | – | 1,11 |

На рис. 5 представлены диаграммы отражения, полученные при сканировании объемно увлажненного образца *CFRP* сфокусированным *E*-поляризованным волновым пучком, а на рис. 6 – сфокусированным *H*-поляризованным волновым пучком (образец 4.3-*UT*).

Для корректного сравнения коэффициентов отражения по цветовой гамме при построении изображений, размах в децибелах для случая сканирования сухой и сухой половинок устанавливался таким же, как и для случая сканирования сухой и увлажненной половинок, а цветовые гаммы сухой половинки в обоих случаях устанавливались близкими путем подбора пределов коэффициента отражения при построении изображений.

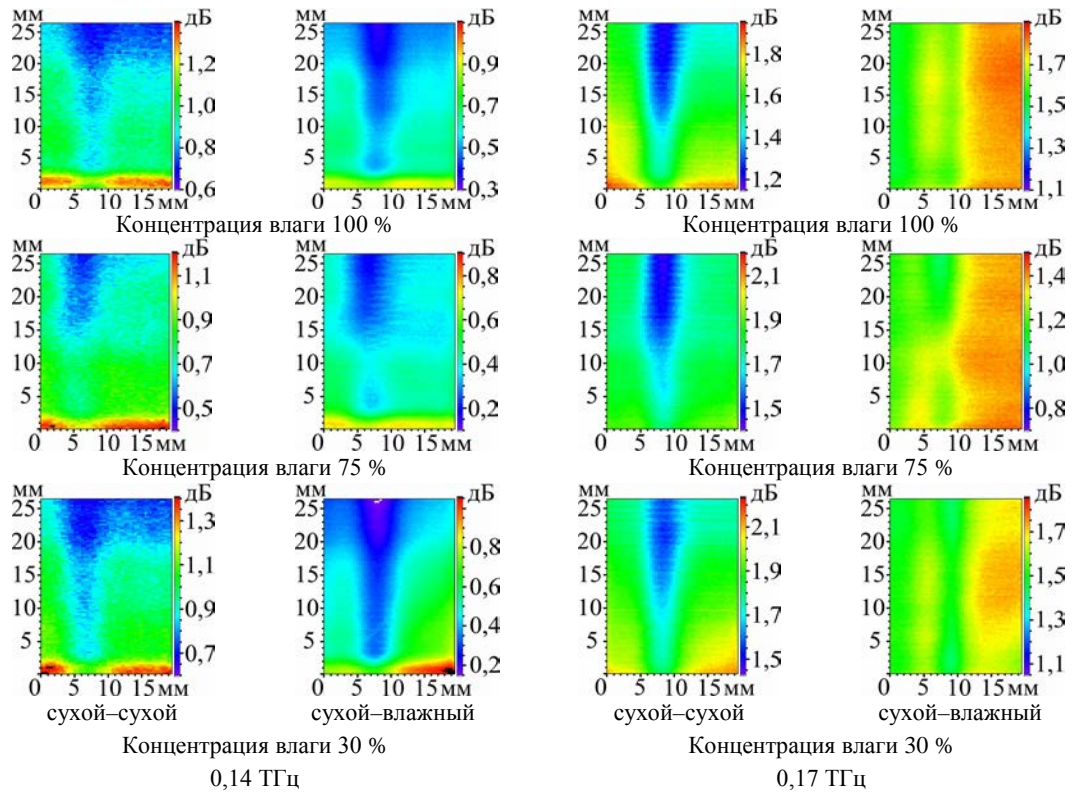


Рис. 5. Амплитудные диаграммы отражения, полученные при сканировании объемно увлажненного образца *CFRP* сфокусированным *E*-поляризованным волновым пучком при согласованном поляризационном приеме отраженной волны для различного содержания влаги

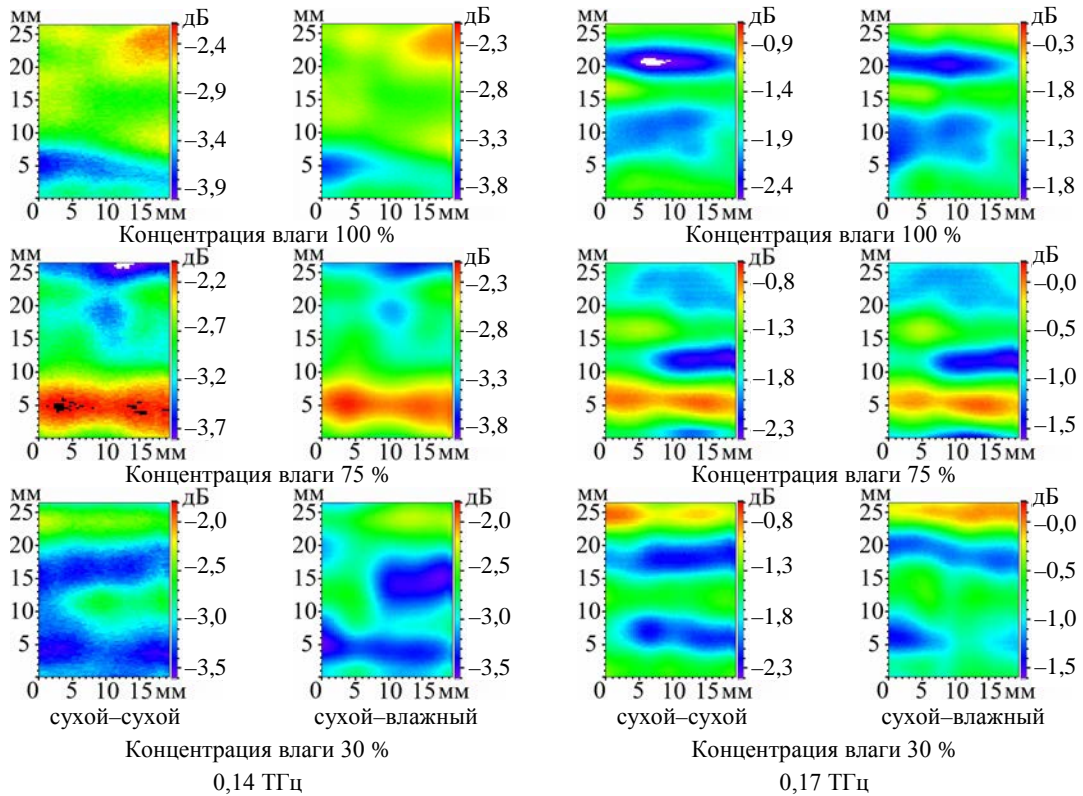


Рис. 6. Амплитудные диаграммы отражения, полученные при сканировании объемно увлажненного образца *CFRP* сфокусированным *H*-поляризованным волновым пучком при согласованном поляризационном приеме отраженной волны для различного содержания влаги

Такая необходимость связана с погрешностями калибровки, проводимой перед каждым измерением. Это приводит к разбросу коэффициента отражения одной и той же сухой половинки образца от измерения к измерению в пределах $0,1 \div 0,5$ дБ.

Как видно из рисунков, влияние влаги на коэффициент отражения наблюдается только на частоте 0,17 ТГц при *E*-поляризации облучающего излучения и составляет $\sim 0,25$ дБ при изменении коэффициента отражения в зоне сканирования в пределах $\sim 0,8$ дБ.

При этом влияние объемного увлажнения на коэффициент отражения при 75 % концентрации влаги практически не отличается от такого влияния при 100 % концентрации влаги, и лишь при 30 % концентрации становится заметным уменьшение контрастности коэффициента отражения от увлажненной половинки в сравнении с сухой.

На частоте 0,14 ТГц влияние влаги не выявлено.

Для *H*-поляризации влияние влаги не выражено как на частоте 0,14 ТГц, так и на частоте 0,17 ТГц. Возможно, это связано с тем, что изменение коэффициента отражения, вызванное внутренней структурой образца как такового, в зоне сканирования при *H*-поляризации составило $\sim 1,8$ дБ, на фоне которого влияние влаги менее заметно.

Кроме того, для *H*-поляризации более выражена зависимость изменения амплитудно-частотной характеристики от места облучения одного и того же образца, чем для *E*-поляризации (рис. 7).

Это может быть связано с неоднородностью компаунда, связующего волокна, а также с тем, что при изготовлении углепластика расстояние между углеродными волокнами меняется случайным образом, что приводит к различиям частотных свойств коэффициента отражения различных участков образца при его зондировании *H*-поляризованной волной.

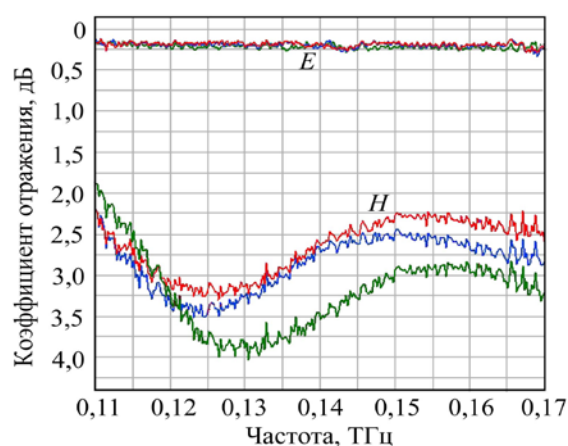


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики отражения от различных участков сухого образца для *E*- и *H*-поляризаций: синий – облучение середины образца, красный и зеленый – облучение краев образца на расстоянии ~ 15 мм слева и справа от середины соответственно

Такая зависимость также приводит к увеличению уровня фона, маскирующего влияние влаги.

5. Влияние нагрева. Для исследования влияния нагрева на качество поверхности углепластика, подготовленной под склеивание, использовался образец 4.18-*UT2* размерами 50×50 мм, разрезанный пополам, при этом зона сканирования составляла $19,5 \times 26,5$ мм. Обе половинки разрезанного образца совместно сканировались до температурного воздействия, после чего одна из половинок (правая) равномерно по всей поверхности нагревалась в течение 1 ч в термостате до температуры $\sim 220 \div 230$ °С, затем обе половинки соединялись и сканирование образца повторялось.

На рис. 8 и 9 представлены амплитудные диаграммы отражения, полученные при сканировании образца *CFRP* с термическими повреждениями сфокусированными *E*- и *H*-поляризованными волновыми пучками на частотах 0,14 и 0,17 ТГц соответственно.

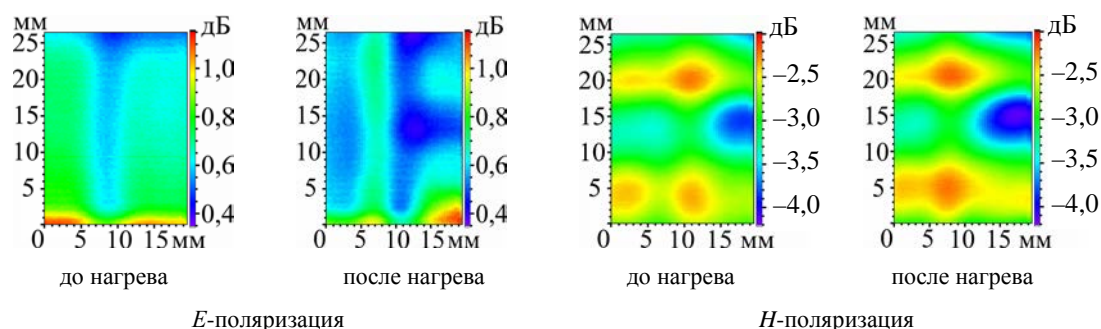


Рис. 8. Результаты сканирования поверхности образца углепластика с термическими повреждениями сфокусированным *E*- и *H*-поляризованным волновым пучком на частоте 0,14 ТГц при согласованном поляризационном приеме отраженной волны

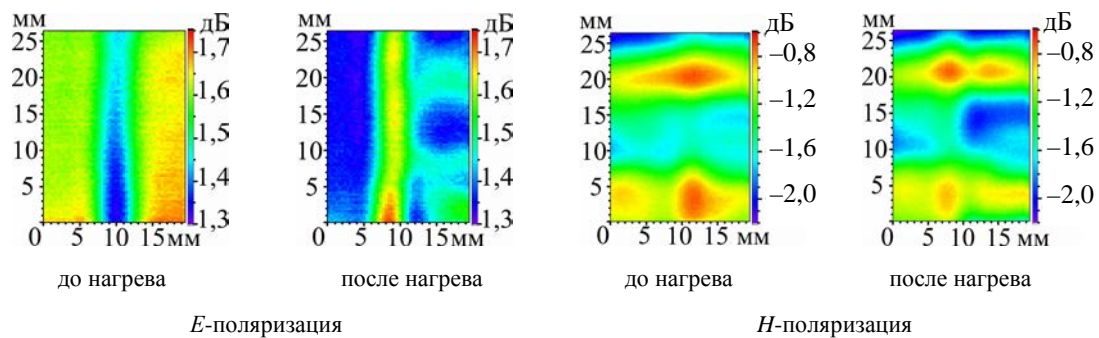


Рис. 9. Результаты сканирования поверхности образца углепластика с термическими повреждениями сфокусированным E - и H -поляризованным волновым пучком на частоте 0,17 ТГц при согласованном поляризационном приеме отраженной волны

О характере повреждений можно сделать предварительный вывод, что несмотря на равномерный нагрев, они носят приблизительно периодический характер с периодом примерно 13 мм и вытянуты в направлении углеродных волокон верхнего слоя углепластика (для исследуемого нами образца). При этом, как и для случая увлажнения, влияние термических повреждений более выражено для E -поляризации, причем, в отличие от случая увлажнения, оно наблюдается как на частоте 0,14 ТГц, так и на 0,17 ТГц.

Для H -поляризации такое влияние наблюдается (хотя и менее выраженное) на частоте 0,17 ТГц. На частоте 0,14 ТГц для H -поляризации влияние термических повреждений на коэффициент отражения для указанного режима нагрева образца не наблюдалось. Причина этого, очевидно, такая же, как и для случая увлажнения – больший уровень фона в случае облучения образца H -поляризованной волной.

Выводы. Исследован КО-метод поляризационно-частотной рефлектометрии при нормальном облучении поверхности $CFRP$ сфокусированным линейно поляризованным КО-пучком при различных азимутах вектора поляризации в суб-ТГц области для обнаружения влияния объемного увлажнения и термического повреждения образцов углепластика $CFRP$ на качество поверхности, подготовленной для склеивания.

Проведенные предварительные исследования чистых и поврежденных $CFRP$ пластин в суб-ТГц области частот показали, что при нормальном облучении поверхности образца амплитудные измерения коэффициента отражения позволяют при правильном выборе поляризации обнаружить присутствие влаги в материале образца, а также проявить подповерхностную структуру материала и выявить неоднородности, обусловленные внутренними термическими повреждениями.

Проведенные исследования позволяют в целом сделать вывод о возможности использования рассмотренного метода КО поляризационно-

частотной рефлектометрии, при соответствующем усовершенствовании аппаратуры и методов обработки данных, для оценки состояния поверхности углепластика, подверженного внутренним повреждениям. Для повышения чувствительности и пространственной разрешающей способности необходимо продвигаться в сторону укорочения рабочих длин волн, соответствующих субмиллиметровой части ТГц-спектра.

Благодарности. Исследования, приведшие к полученным результатам, получили частичную финансовую поддержку от Евросоюза в рамках проекта *ENCOMB* по 7-й Рамочной программе ЕС по гранту *ACP0-GA-2010-266226 (ENCOMB, Extended Non-Destructive Testing of Composite Bonds)*.

Библиографический список

1. Wang S. Pulsed terahertz tomography / S. Wang, X. Zhang // *J. Appl. Phys.* – 2004. – **Д**, N 37. – P. R1–R36.
2. Damage and defect inspection with terahertz waves / A. Redo-Sanchez, N. Karpowicz, J. Xu, X. C. Zhang // *Proc. the 4th Intern. Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization.* – Dartmouth, 2006. – P. 67–78.
3. Terahertz quality control of polymeric products / F. Rutz, R. Koch, S. Khare et al. // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* – 2006. – **27**. – P. 547–556.
4. Terahertz imaging: a new nondestructive technique for the quality control of plastic weld joints / S. Wietzke, C. Jordens, N. Krumbholz et al. // *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* – 2007. – **2**. – P. 07013-07017.
5. Stoik C. D. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy / C. D. Stoik, M. J. Bohn, J. L. Blackshire // *Optics Express.* – 2008. – **16**, N 21. – P.17039–17051.
6. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems / R. Piesiewicz, C. Jansen, D. Mittleman et al. // *IEEE Trans. Ant. Prop.* – 2007. – **55**. – P.3002–3009.
7. Propagation of terahertz radiation through random structures: an alternative theoretical approach and experimental validation / J. R. Fletcher, G. P. Swift, Dai De Chang et al. // *J. Appl. Phys.* – 2007. – **101**. – P. 013102–013110.
8. Lee S. Scattering by a dense layer of infinite cylinders at normal incidence / S. Lee // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2008. – **25**, iss. 5. – P. 1022–1029.
9. Elmika Millimeter-Wave Measurement Instruments and Waveguide Components [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elmika.com. – Загл. с экрана.

10. А. с. СССР. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / А. Н. Ахизер, А. И. Горшко, Б. Н. Князьков и др. – № 302054. – 1972. – Бюл. № 8. – С. 235.
11. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* // А. Я. Усиков, Э. А. Канер, И. Д. Трутеня и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – 368 с.
12. *Quasi-Optical Radio Measuring Devices on the Basis of a Circular Hollow Dielectric Beamguide of Submillimeters and Millimeters Waves* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ire.kharkov.ua/depquasi/quasiuk.html>. – Загл. с экрана.

Рукопись поступила 04.06.2012.

V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliyov, Ye. M. Kuleshov,
P. K. Nesterov, S. V. Mizrakhii, M. S. Yanovsky

EVALUATION OF THE INFLUENCE
OF DEFECTS ON THE QUALITY
OF COMPOSITES USING A QUASI-OPTICAL
POLARIZATION-FREQUENCY
REFLECTOMETRY IN SUB-TERAHERTZ
REGION

Quasi-optical polarization-frequency reflectometry in subterahertz (sub-THz) frequency range has been considered as a nondestructive method for detecting of subsurface damage of composite materials. Such materials are used in modern aerospace industry to create a strong lightweight structures using adhesive technology. The present work is devoted to the investigation of the possibility of detecting volumetric moisture and thermal damage of the a carbon fibers reinforced plastic (CFRP) structures in order to evaluate a quality of surface preparation before CFRP samples bonding. For this purpose we have used a quasi-optical systems for beamguiding polarization measurements in the sub-THz frequency range (0.1...0.2 THz). The measurements of amplitude-frequency and polarization reflecting characteristics of the CFRP samples showed that the thermal effects and volumetric moisture lead to

changes of reflecting characteristics of samples in this frequency range. The promising results are obtained to use this method when creating means for nondestructive testing and evaluation of the quality of the surface of the CFRP composites before bonding.

Key words: quasi-optics, terahertz, polarization-frequency reflectometry, nondestructive testing, carbon plastics.

В. І. Безбородов, В. К. Кісельов, Є. М. Кулешов,
П. К. Нестеров, С. В. Мізрахі, М. С. Яновський

ОЦІНКА ВПЛИВУ ДЕФЕКТІВ НА ЯКІСТЬ
КОМПОЗИТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
КВАЗІОПТИЧНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-
ЧАСТОТНОЇ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ
В СУБТЕРАГЕРЦОВІЙ ОБЛАСТІ

Розглянуто квазіоптичну поляризаційно-частотну рефлектометрію в субтерагерцовій (суб-ТГц) області частот з погляду її застосовності в якості неруйнуючого методу виявлення підповерхневих ушкоджень композиційних матеріалів, що використовуються в сучасній аерокосмічній промисловості при створенні міцних легковагових конструкцій із застосуванням клейових технологій. Досліджено можливість виявлення об'ємних зволожений і термічних ушкоджень структур з полімеру, армованого волокнами вуглецю (CFRP), з метою оцінки якості підготовки поверхні зразків CFRP перед склеюванням із використанням квазіоптичних променевідних систем для поляризаційних рефлектометричних вимірів у суб-ТГц області частот (0,1...0,2 ТГц). Вимірювання амплітудно-частотних і поляризаційних характеристик відбиття матеріалів на зразках CFRP показало, що термічний вплив і об'ємне зволоження спричиняє зміну характеристик відбиття вуглепластика в цьому діапазоні частот, що дозволяє сподіватися на використання цього методу при створенні перспективних засобів неруйнуючого контролю й оцінки якості підготовки поверхні CFRP композитів перед склеюванням.

Ключові слова: квазіоптика, терагерцовий діапазон, поляризаційно-частотна рефлектометрія, неруйнуючий контроль, вуглепластики.