

В. И. Безбородов, В. К. Киселев, О. С. Косяк, Е. М. Кулешов, П. К. Нестеров, 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

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ СУБТЕРАГЕРЦЕВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Широкое использование в современном авиастроении углепластиков потребовало разработки способов неразрушающего контроля состояния их поверхности и определения наличия влаги и термических повреждений, влияющих на качество клеевых соединений. Применяемые в терагерцевом диапазоне длин волн для этих целей обычные методы рефлектометрии дают очень малый контраст сигналов, отраженных от чистых и загрязненных образцов. В данной работе рассмотрен метод рефлектометрии внутреннего отражения при наклонном облучении поверхности углепластиков квазиоптическим (КО) пучком под разными углами через призму внутреннего отражения, расположенную вблизи поверхности образца. Для реализации метода разработана КО измерительная установка, выполненная на основе полого диэлектрического лучевода и комплекса лучеводных устройств и компонентов ТГц диапазона. Проведены экспериментальные тестирования образцов композитных материалов, показавшие значительное возрастание контраста при обнаружении загрязнений. При технической доработке рефлектометр может быть использован на практике. Ил. 8. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: квазиоптика, терагерцевый диапазон, рефлектометрия, неразрушающий контроль, углепластики.

Композитные материалы и, в частности, углепластики (*CFRP*) широко используются в качестве структурных компонентов в авиастроении благодаря их высокой прочности, легкости и весьма низкой коррозии по сравнению с другими конструкционными материалами. При этом для создания различных конструкций из композитов вместо традиционных заклепочных соединений применяются клеевые. Обеспечение качества таких сочленений является важнейшей задачей в авиастроении. Качество клеевых соединений напрямую зависит от присутствия поверхностных и подповерхностных загрязнений углепластика, а их обнаружение неразрушающими методами является одной из основных операций технологического процесса.

К перспективным методам неразрушающего контроля поверхностных и подповерхностных дефектов композитов относится использование терагерцевого (ТГц) электромагнитного излучения (0,1...10 ТГц). Диагностика загрязнений и повреждений в углепластике путем просвечивания образца в этом и в других диапазонах радиочастот затруднена из-за большого ослабления электромагнитных волн в материале *CFRP*, поэтому представляют интерес исследования возможности обнаружения и оценки степени таких дефектов по отраженному сигналу.

В работе [1] для обнаружения поверхностных и подповерхностных загрязнений углепластика был рассмотрен и экспериментально исследован метод поляризационно-частотной рефлектометрии, заключающийся в сканировании исследуемой поверхности образца нормально падающим сфокусированным волновым пучком в диапазоне частот 0,173...0,225 ТГц при различных линейных поляризациях и частотах, и регистрации изменений модуля амплитудного коэф-

фициента отражения, вызванных появлением дефекта на границе раздела сред. Измерения амплитудно-частотных характеристик отражения пучков, поляризованных параллельно (*E*-поляризация) и перпендикулярно (*H*-поляризация) относительно направления волокон в поверхностном слое *CFRP*, выявили наличие контраста в отражении при переходе от чистых к загрязненным образцам. Вместе с тем было обнаружено, что неравномерность коэффициента отражения при сканировании чистого образца (фон), незначительная для *E*-поляризованной волны, сильно возрастает для *H*-поляризованной волны и маскирует слабый контраст отражений от чистых и загрязненных образцов. Качественно зависимость различия фона от поляризации можно объяснить, рассмотрев внутреннюю структуру композита.

Образцы *CFRP* марки М-21, представленные нам в рамках работы [2], состоят из трех ортогонально ориентированных примыкающих слоев (рис. 1).

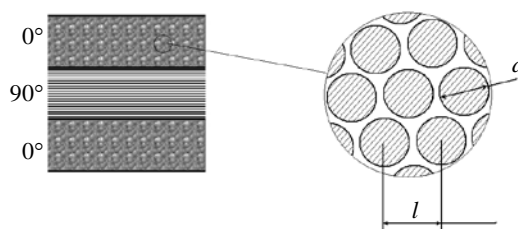


Рис. 1. Внутренняя структура *CFRP* марки М-21

Каждый слой представляет собой параллельно направленные углеродные волокна диаметром $d \approx 10$ мкм, залитые компаундом (эпоксидной смолой). По данным производителя, углеродные волокна по весу составляют около 80 % композита, что соответствует среднему периоду

решетки, образованной волокнами, $l \approx 10,5$ мкм. Такую объемную решетку можно представить в виде набора близко расположенных одномерных решеток [3] с коэффициентом заполнения $S = d/l \approx 0,95$ и $\chi = d/l \approx \chi = l/\lambda \approx 10^{-2}$ на средней длине волны λ диапазона, распространяющейся в компаунде.

Период решетки l может иметь разброс, обусловленный процессом производства CFRP. Согласно [3], коэффициент отражения E -поляризованной волны одномерной поляризующей решетки R_E вблизи $\chi \approx 10^{-2}$ и $S \approx 0,95$ практически равен единице и очень слабо зависит от небольших изменений l . Коэффициент отражения H -поляризованной волны R_H мал (≈ -20 дБ), но существенно зависит от l (рис. 2).

Очевидно, это и вызывает повышенную неравномерность фона при сканировании образца.

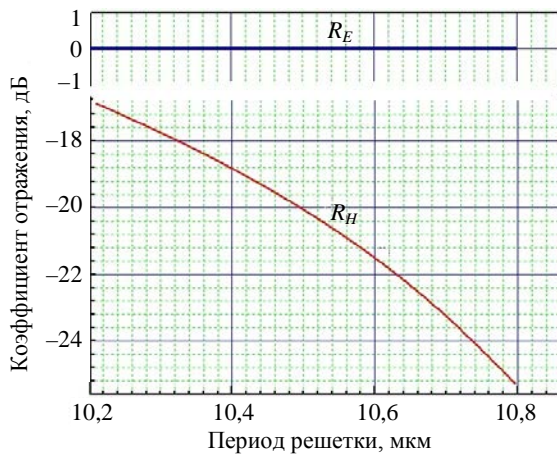


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения E - и H -поляризованных волн от одномерной поляризующей решетки при нормальном падении от периода

Отсюда также следует, что E -поляризованная волна отражается практически полностью поверхностным слоем углепластика, не проникая вглубь. Для нее поверхность углепластика является поверхностью с высокой проводимостью. H -поляризованная волна проникает вглубь углепластика. Коэффициент ее отражения, значительно превышающий отражение от одномерной поляризующей решетки (соответственно $\approx -2,5$ дБ и ≈ -20 дБ), является результатом сложения волн, отраженных от волокон, которые находятся на различной глубине. Для этой волны углепластик можно считать сложным диэлектриком (компаунд плюс углеродные волокна) с эффективным показателем преломления $n_{эф} \approx 7$, что подтверждается наличием выраженного угла Брюстера при угле падения около 82° .

1. Метод квазиоптической рефлектометрии внутреннего отражения. Повысить амплитудный контраст отражений от чистой и за-

грязненной областей поверхности CFRP и уменьшить фоновый сигнал из-за неоднородности углепластика можно путем применения амплитудно-интерференционного режима квазиоптической рефлектометрии с использованием особенности внутреннего отражения (ВО) на границе диэлектрик–воздух. На рис. 3 представлена схема установки для исследования поверхностных неоднородностей материалов методом квазиоптической (КО) рефлектометрии ВО: 1 – твердотельный генератор; 2 – амплитудный модулятор; 3 – поляризационный аттенюатор; 4, 8 – линейный поляризатор; 5 – блок для исследования пластин CFRP (измерительная ячейка); 6 – трехзеркальный вращатель плоскости поляризации; 7 – вращающееся сочленение; 9 – переход от полого диэлектрического волновода (ПДЛ) к одномодовому волноводу; 10 – детектор, соединенный через блок сопряжения 11 с персональным компьютером (ПК); 12 – X-Y сканер.

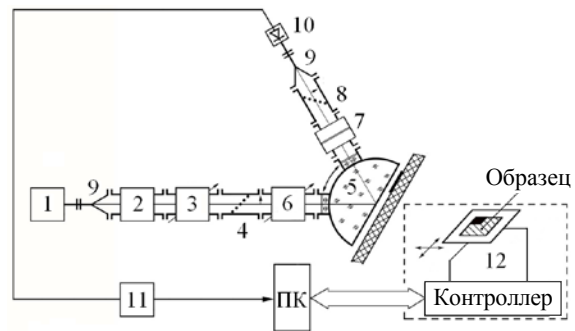


Рис. 3. Схема КО установки для проведения измерений методом рефлектометрии ВО

Измерительная ячейка блока для исследования углепластиковых пластин (рис. 4) содержит диэлектрический (кварцевый) полуцилиндр ВО 1 [4] со скользящим по его боковой цилиндрической поверхности входным 2 и выходным 3 ПДЛ [5, 6] диаметром $2a = 20$ мм, содержащими кварцевые вкладыши, согласованные четвертьволновыми слоями диэлектрика (тефлона).

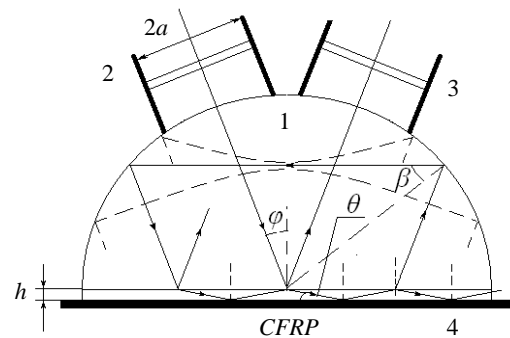


Рис. 4. Измерительная ячейка для исследования пластин CFRP

Угол падения – отражения φ волны (угол между лучеводами) регулируется. По существу измерительная ячейка является равнобедренной треугольной призмой с изменяющимся углом между гранями. Механизм движения обеспечивает перемещение пластины CFRP 4 вдоль плоской поверхности полуцилиндра на расстоянии h , сохраняя между ними строгую параллельность и возможность регулировки воздушного зазора в процессе исследования.

Индикация загрязнений методом КО-рефлектометрии ВО осуществлялась по изменению глубины интерференционного минимума волн, отраженных от внутренней границы кварцевого полуцилиндра 1 и поверхности углепластика. Последняя волна из-за значительного пространственного смещения поступает в выходной лучевод не сразу, а дважды отразившись от цилиндрической поверхности кварцевой призмы под углом полного внутреннего отражения (ПВО) $\beta = \frac{90 - \varphi}{2} > \varphi_{кр}$ и поверхности углепластика под малым углом скольжения θ . На своем пути волна трижды испытывает деление на границе кварц–воздух, в двух из которых происходит рассеяние части мощности, а при третьем часть волны вновь проходит по вышеупомянутому контуру.

Таким образом измерительная ячейка является многопроходным интерферометром-резонатором с невысокой, в силу рассеяния части мощности, добротностью. Амплитудно-фазовая характеристика волны на выходе такого интерферометра имеет вид:

$$\frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = \frac{r + R^2(1 - r^2)e^{j2Q}}{1 + R^2(1 - r^2)re^{j2Q}}, \quad (1)$$

где r – коэффициент внутреннего отражения от границы раздела кварц–воздух при угле падения φ ; R – модуль комплексного коэффициента отражения от углепластика $\hat{R} = Re^{j\xi}$; Q – набег фазы, включающий набег из-за электрической разности хода, фазу ПВО при угле падения β и фазу комплексного коэффициента отражения от углепластика ξ .

Глубина интерференционного минимума зависит от соотношения $|r|$ и R и максимальна при

$$|r| = \frac{\sqrt{1 + 4R^4} - 1}{2R^2}, \quad (2)$$

а при R близком к единице необходимая величина $|r|$ составляет около 0,62 по полю.

Необходимые для получения глубокого интерференционного минимума амплитудные и фазовые соотношения волн реализуются выбором угла падения и расстояния между полуцилиндром и углепластиком.

Из приведенных на рис. 5 расчетных зависимостей коэффициентов отражения $|r_p|$ и $|r_s|$ от

угла падения для внутреннего отражения от границы кварц–воздух необходимая величина $|r|$ реализуется для поляризации, параллельной плоскости падения (P -поляризация) при угле падения $\varphi \approx 28,3^\circ$, а для ортогональной поляризации (S -поляризация) – при $\varphi \approx 25,2^\circ$. Ввиду близости этих углов к критическому углу ПВО ($\varphi_{кр} = 28,4^\circ$) у поверхности углепластика создается скользкое проникающее поле. На рис. 4 также приведен угол скольжения θ волны, падающей на поверхность углепластика.

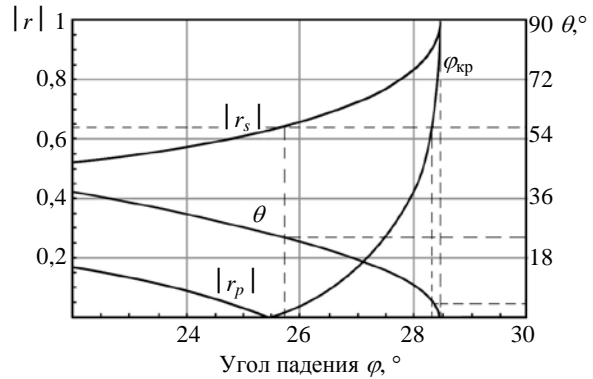


Рис. 5. Зависимость коэффициентов отражения и угла скольжения от угла падения для внутреннего отражения от границы кварц–воздух

При малых углах скольжения электромагнитная волна взаимодействует с поверхностными загрязнениями углепластика эффективнее, чем при нормальном падении. С уменьшением угла скольжения и зондировании S -поляризованной волной также монотонно снижается фоновая неравномерность коэффициента отражения чистого углепластика. Зондирование P -поляризованной волной при углах падения, близких к углу Брюстера, наоборот вызывает рост фоновой неравномерности. Учитывая, что фоновая неравномерность при облучении E -поляризованной относительно волокон волной при нормальном падении невелика, а угол Брюстера из-за высокой проводимости углепластика слабо выражен, скользкое падение значительных изменений в фон не вносит. Облучение же H -поляризованной относительно волокон волной из-за близости рабочего угла падения ($\sim 85^\circ$) к углу Брюстера ($\sim 82^\circ$) и изначальной неравномерности коэффициента отражения углепластика вызывает резкий рост фоновой неравномерности. Поэтому в дальнейшем режим облучения такой волной не рассматривается.

Снижению уровня фона способствует и то, что в методе КО-рефлектометрии внутреннего отражения используется сравнительно широкий нефокусированный пучок. Облучение поверхности углепластика широким пучком позволило усреднить влияние небольших по площади ло-

кальных неоднородностей на результат измерений. Заметим, что основную часть пути пучок распространяется в кварце ($n = 2,1$), поэтому расходимость пучка очень мала. В плоскости, ортогональной плоскости падения, расходимость может быть устранена выбором толщины кварцевого полуцилиндра равной $2a$. В плоскости падения слабо расходящийся пучок дважды отражается от цилиндрической поверхности призмы в режиме ПВО. Радиус кривизны этой поверхности намного меньше необходимого для корректировки расходимости, но его можно выбрать таким, чтобы перетяжка гауссового пучка (фокус) находилась вблизи оси симметрии ячейки 5 (рис. 4). Проведенные графические построения показывают, что это возможно при выборе радиуса полуцилиндра около $3a$.

Зависимость глубины интерференционного минимума при изменении модуля и фазы коэффициента отражения от поверхности углепластика в результате загрязнения при выполнении условия (2) представлены на рис. 6 сплошными кривыми.

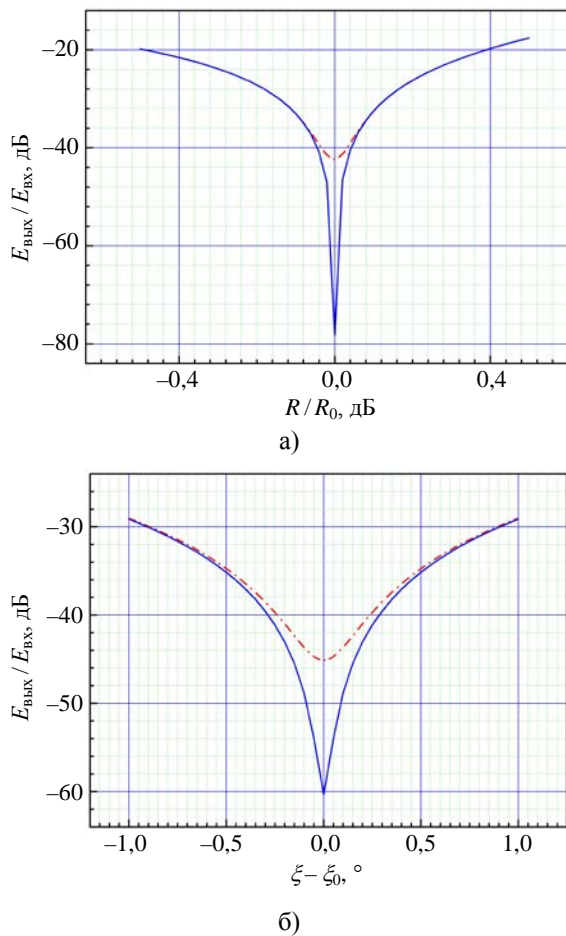


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала от изменения модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения углепластика, где R_0 и ξ_0 соответственно усредненные модуль и фаза коэффициента отражения от чистого углепластика

Из приведенных графиков видно, что при достаточно высоком потенциале установки очень слабые изменения модуля и фазы коэффициента отражения углепластика вызывают легко различимые изменения уровня выходного сигнала. При этом любые изменения комплексного коэффициента отражения углепластика приводят к уменьшению глубины интерференционного минимума.

2. Результаты исследований. Экспериментальные исследования проводились на частоте 0,138 ТГц для различных случаев ориентации плоскости поляризации зондирующего сигнала относительно плоскости падения и направления углеродных волокон. Фото внешнего вида установки для измерений методом КО-рефлектометрии ВО в суб-ТГц области приведено на рис. 7.



Рис. 7. Установка для осуществления измерений методом КО-рефлектометрии ВО в суб-ТГц области

Амплитудный контраст между сигналами, отраженными от чистой и загрязненной области углепластика, пропорционален глубине интерференционного минимума для чистой области (калибровочного уровня). Погрешности, вызванные неоднородностями поверхности чистого участка образца и изменением величины воздушного зазора в процессе измерения, также пропорциональны уровню калибровочного минимума. Было установлено, что при потенциале установки около 65 дБ оптимальной является глубина этого минимума около -45 дБ, что достигается очень небольшим изменением угла падения. При этом фоновая девиация модуля и фазы коэффициента отражения углепластика лежат в области малой крутизны изменения выходного сигнала (штрихпунктирные кривые на рис. 6). Это позволяет при частотной стабильности генератора не хуже 10^{-5} получить максимальную погрешность измерений не более $\pm 1,5$ дБ.

На рис. 8 показана типичная зависимость выходного сигнала при равномерном перемещении частично загрязненного образца поперек гра-

ницы загрязнения (в данном случае кремниевой смазкой, поляризация-*PE*) параллельно плоскости падения (продольное перемещение). Наблюдаемое некоторое возрастание выходного сигнала вблизи границы загрязнения, по-видимому, связано с деформацией фазового фронта отраженного от углепластика пучка, когда в области пятна падающей волны находятся одновременно участки чистого и загрязненного углепластика. Это приводит к отклонению направления распространения отраженного пучка, что вызывает дополнительную расстройку интерферометра. Данный эффект несколько компенсирует снижение разрешающей способности из-за использования сравнительно широкого пучка.



Рис. 8. Зависимость глубины интерференционного минимума при продольном перемещении образца, частично загрязненного кремниевой смазкой

Конструкция измерительной ячейки, которая была использована при проведении экспериментального исследования, не позволяла перемещать образец ортогонально плоскости падения (поперечное перемещение). Скорее всего, возрастание выходного сигнала вблизи границы загрязнения в этом случае будет незначительным, так как при выборе толщины кварцевого полуцилиндра, равной диаметру ПДЛ, полуцилиндр удерживает пучок не только от расхождения, но и от отклонения.

В таблице представлены результаты исследования нескольких частично загрязненных образцов *CFRP* в квазистатическом режиме, при котором вместо непрерывного сканирования образца производилось поочередное зондирование чистой и загрязненной области.

Исследования показали, что поверхностные загрязнения скайдролом и кремниевой смазкой наиболее контрастно обнаруживались при *E*-поляризации зондирующего сигнала, параллельного плоскости падения (*PE*-поляризация). При этом угол падения пучка составил около 28° (критический угол $28,5^\circ$), а угол скольжения пучка относительно исследуемой поверхности θ – около 5° . Термические повреждения и влага эффективнее

обнаруживались при *H*-поляризации зондирующего сигнала, ортогональной плоскости падения (*SH*-поляризация), при угле падения около 26° и угле скольжения θ – около 20° .

Результаты исследования частично загрязненных образцов *CFRP*

Вид загрязнений	Глубина калибровочного минимума, дБ	Контраст при переходе от чистого образца к загрязненному, дБ	Поляризация	
Кремниевая смазка	-42	7 ± 1	<i>PE</i>	
Скайдрол	-45	4 ± 1	<i>PE</i>	
Влажность, %	30	-45	$5 \pm 1,5$	<i>SH</i>
	100	-45	$10 \pm 1,5$	<i>SH</i>
Термическое воздействие, °	220	-40...-50	Не обнаружен	-
	300	-45	$5 \pm 1,5$	<i>SH</i>

Как видно из приведенной таблицы, рефлектометр позволяет достаточно уверенно выявлять присутствие некоторых видов загрязнений *CFRP*. При этом чисто поверхностные загрязнения кремниевой смазкой или скайдролом следует индцировать при *PE*-поляризации зондирующего сигнала, а наличие влаги или температурной деструкции углепластика – при *SH*-поляризации.

Выводы. Тестирование углепластиков, проведенные методом КО-рефлектометрии внутреннего отражения в суб-ТГц области частот, показало высокую чувствительность данного метода, что позволило существенно повысить амплитудный контраст отраженных сигналов от чистой и загрязненной областей поверхности *CFRP*. Выявлены наиболее благоприятные виды поляризации зондирующего сигнала для обнаружения поверхностных и подповерхностных загрязнений. При использовании достаточно стабильной аппаратуры, обеспечивающей за время сканирования частотную стабильность не хуже 10^{-5} , и при соответствующих конструктивных решениях, обеспечивающих постоянство величины воздушного зазора с погрешностью не более 10^{-2} мм, а также сохранение ориентации плоскости поляризации зондирующего сигнала относительно направления волокон, рефлектометр ВО может быть использован на практике.

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

Библиографический список

1. Оценка влияния дефектов на качество композитов с использованием квазиоптической поляризационно-частотной рефлектометрии в субтерагерцевой области / В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Е. М. Кулешов и др. // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 3. – С. 91–97.
2. Грант 7-й Рамочной Программы ЕС «Extended Non-Destructive Testing of Composite Bonds» (проект ENCOMB), договор № 266226.
3. Дифракционные решетки / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов, Ю. А. Сиренко. – К.: Наук. думка, 1986. – 232 с.
4. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения / Н. Харрик; пер. с англ. под ред. В. А. Никитина. – М.: Мир, 1970. – 335 с.
5. А. с. 302054 СССР, МКИ Н 01 Р 3/00. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / А. Н. Ахиезер, А. И. Горошко, Б. Н. Князьков и др. – № 1380503/26-9; заявл. 28.11.69; опубл. 1972, Бюл. № 8. – 2 с.
6. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн // Под ред. А. Я. Усикова, Э. А. Канера, И. Д. Трутня и др. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 140–157.

Рукотпись постутила 03.01.2013 г.

V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliiov, O. S. Kosiak,
Ye. M. Kuleshov, P. K. Nesterov, M. S. Yanovsky

QUASI-OPTICAL SUB-TERAHERTZ INTERNAL REFLECTION REFLECTOMETER FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CARBON MATERIALS

The widespread use of carbon composites in modern aircraft required the development of methods of non-destructive monitoring of the surface and determines the presence of moisture and heat damage, affecting the quality of adhesive joints. Applicable in the terahertz range of wavelengths for this purpose conventional reflection methods give very low contrast signals reflected from clean and contaminated samples. This paper

presents a method of the internal reflection reflectometry for oblique irradiation of the surface carbon fiber with quasioptical (QO) beam at different angles through the prism of internal reflection, which are located near the surface of the sample. For realization of the method a QO-measuring installation executed on the basis of the hollow dielectric beam waveguide and a complex of the beam waveguide devices and components of the THz range was developed. Research of samples of composite materials was conducted, it showed a considerable increase of a contrast at detection of a pollution. After technical completion the reflectometer can be used in practice.

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

V. I. Безбородов, В. К. Кісельов, О. С. Косьяк,
Є. М. Кулешов, П. К. Нестеров, М. С. Яновський

КВАЗІОПТИЧНИЙ СУБТЕРАГЕРЦЕВИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИТТЯ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ

Широке використання в сучасному авіабудуванні вуглепластиків потребує розробки способів неруйнівного контролю стану їх поверхні і визначення наявності вологи і термічних пошкоджень, що впливають на якість клейових з'єднань. Вживані в терагерцевому діапазоні довжин хвиль для цих цілей звичайні методи рефлектометрії дають дуже малий контраст сигналів, відбитих від чистих і забруднених зразків. У даній роботі розглянуто метод рефлектометрії внутрішнього відбиття при похилому опроміненні поверхні вуглепластиків квазіоптичним (КО) пучком під різними кутами крізь призму внутрішнього відбиття, яка розміщена поблизу поверхні зразка. Для реалізації методу розроблена КО-вимірювальна установка, що виконана на основі порожнистого діелектричного променеводу і комплексу променевідних пристроїв та компонентів ТГц діапазону. Проведено експериментальні дослідження зразків композитних матеріалів, що показали значне підвищення контрасту при виявленні забруднень. При технічній доробці рефлектометр може бути використано на практиці.

Ключові слова: квазіоптика, терагерцевий діапазон, рефлектометрія, неруйнівний контроль, вуглепластики.