

УДК 620.179

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ И
КРУПНО-СТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. И. ПОТАПОВ

ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»
Санкт-Петербург, Россия

В современной науке и технике, особенно в авиакосмической отрасли, судостроении, строительстве и др. широкое распространение находят неметаллические композиционные и крупно-структурные материалы, такие как бетон и железобетон, асфальтобетон, стекло, органо- и углепластики, углерод-углеродные композиционные материалы, пористые материалы (пенопласт, газобетон и др.), абразивные материалы, горные породы, древесина и др. Неразрушающий контроль качества изделий из этих материалов, особенно крупно-габаритных и толстостенных, весьма затруднен из-за их специфических свойств. Приборы и методы, используемые для металлов практически не пригодны или слабо пригодны для вышеуказанных материалов, так ультразвуковые методы – из-за сильного поглощения и рассеяния высокочастотных ультразвуковых колебаний, электромагнитные методы – так как являются не магнитными и не электропроводными или плохими проводниками (материалы на основе углерода), рентгеновские – мало эффективны из-за низкой плотности, тепловые – из-за малой теплопроводности и т.д.

В результате анализа и изучения литературных источников установлено, что наибольшей эффективностью обладают такие методы как низкочастотные ультразвуковые методы, радиоволновые и оптические методы.

Для контроля физико-механических свойств и дефектоскопии композиционных материалов (преимущественно бетона и железобетона) широкое распространение в 80-е годы получили приборы УКБ-1, УКБ-1М, ДУК-20, «Бетон» и др.

В этих приборах использованы преобразователи со значительно более низким диапазоном частот (25–150 кгц). Однако в данных приборах реализуется метод, основанный на применении только двух преобразователей: излучателя и приемника ультразвуковых волн. Применение совмещенных преобразователей для этих приборов не представляется возможным в связи с большой длительностью (150–300 мксек) ультразвукового сигнала, вырабатываемого излучателем. Поэтому применение этих приборов ограничено необходимостью доступа к изделию с двух сторон, обеспечением значительной базы измерения, низкой производительностью контроля, большим количеством обслуживающего персонала (не мене двух операторов).

В настоящее время широкое распространение получили низкочастотные ультразвуковые приборы – Пульсар-1.1 и Пульсар-1.2, Спектр-1 и Спектр-2, УК1401, ультразвуковой томограф А1040 «Полигон» и др.

Учитывая вышеизложенное, для практики низкочастотных ультразвуковых испытаний важным является разработка такого совмещенного или раздельно-совмещенного преобразователя, который позволит работать в указанном частотном диапазоне при помощи широкополосных сигналов малой длительности типа одиночного выброса.

Для решения данной задачи необходимо проведение комплекса исследований по разработке эхо-импульсной аппаратуры и низкочастотных (20–200 кгц) преобразователей для проведения испытаний на изделиях и конструкциях из композиционных материалов, древесины, бетона, горных пород и других материалов. Эта аппаратура позволяет работать как с одним, так и с двумя преобразователями при помощи специального электронного ключа. Для работы с двумя преобразователями необходимо использовать широкополосный акустический приемник высокой чувствительности. Выполнение этих условий позволит получать объективную и надежную информацию о свойствах материалов по параметрам распространения упругих волн.

Следует отметить, что несмотря на известные решения осуществления эхо-импульсного метода при высокочастотных (свыше 1 мгц) ультразвуковых испытаниях для создания низкочастотного прибора (до 200 кгц) приходится решать ряд принципиально новых технических задач. К числу наиболее важных задач можно отнести следующие:

- согласование генератора возбуждающих импульсов с работой усилителя;
- создание электронного ключа;
- разработка неперегружающегося усилителя;
- исследование и разработка низкочастотных ультразвуковых широкополосных пьезопреобразователей.

Для получения широкополосного упругого импульса длительностью в один период собственных колебаний пьезопреобразователя необходимо обеспечить в спектре собственных колебаний пьезопреобразователя одну частоту на основной моде колебаний, либо кратные частоты мод колебаний, либо разнесенные частоты мод колебаний при этом возбуждение такого преобразователя необходимо производить электрическим сигналом, в спектре которого отсутствует составляющая, равная частоте основной моды.

На кафедре приборостроения Горного университета совместно с ЗАО «Константа» создан экспериментальный макет низкочастотного эхо-импульсного прибора, который работает в эхо-импульсном режиме с преобразователем, излучающим упругий сигнал с регулируемой длительностью в один, два и более периодов основной моды колебаний (рис. 1).

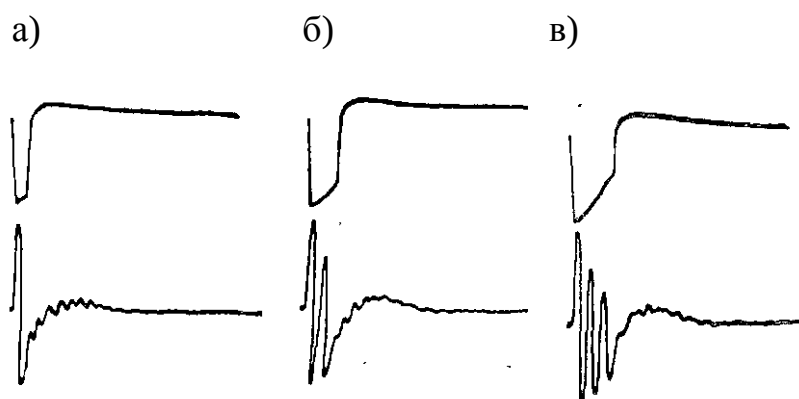


Рис. 1. Форма электрического и ультразвукового сигнала от одномодового моночастотного преобразователя при возбуждении электрическим импульсом: а – длительностью в один период; б – то же, в два периода; в – то же, в три периода

Результаты ультразвукового контроля стеклопластика представлены на рис. 2.



Рис. 2. Осциллограмма ряда отраженных сигналов частотой 50 кГц, длительностью в один период, полученных в изделии из стеклопластика толщиной 40 см

Эксплуатация данного прибора показала его высокую эффективность при неразрушающих испытаниях крупногабаритных конструкций и изделий из композиционных материалов.

Принцип действия радиоволнового метода основан на взаимодействии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с диэлектрическим объектом контроля и регистрации сигнала, вызванного изменением диэлектрических характеристик объекта контроля.

Для обеспечения одновременного контроля в изделии дефектов и изменения диэлектрической проницаемости композиционного материала функциональная схема прибора должна позволить осуществить настройку в режиме амплитудного или фазового измерения. В первом случае информационным параметром является амплитуда, во втором – фаза волны.

Прибор выполнен в виде двух составных частей: датчика и электронного блока (рис. 3).

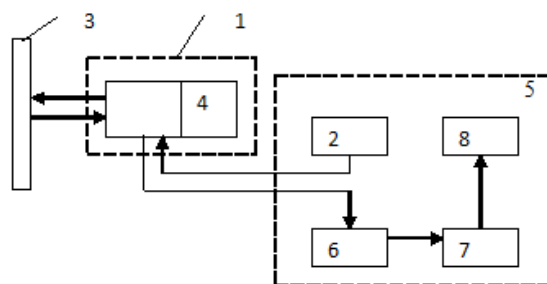


Рис. 3. Структурная схема прибора: 1 – датчик с эталонным образцом, 2 – блок питания и модуляция СВЧ–генератора, 3 – контролируемый объект, 4 – эталонный образец, 5 – электронный блок, 6 – система дефектоскопии, 7 – система определения диэлектрической проницаемости, 8 – компьютер

Работа прибора производится в соответствии со структурной схемой (рис. 3) следующим образом. Источник излучения датчика 1 получает необходимое напряжение от блока питания и модуляции излучателя 2 и вырабатывает электромагнитные колебания, промоделированные меандром. СВЧ–излучение от датчика направляется на контролируемый объект 3 и эталонный образец 4, отраженные от них части излучения взаимодействуют между собой. Результат взаимодействия в виде электрического сигнала выделяется на детекторе датчика. Далее электрические сигналы от детектора подаются в электронный блок 5, в систему дефектоскопии 6, где в автоматическом режиме производится обработка амплитудных характеристик сигнала и выделение сигнала от дефекта, а также производится обработка фазовых характеристик сигнала, который поступает в систему определения диэлектрической проницаемости 7, окончательные результаты контроля обрабатываются и представляются на компьютере 8.

СВЧ – датчик служит для анализа состояния контролируемого материала и выработки сигнала пропорционального изменению состояния материала. Датчик включает в себя СВЧ–тракт (рис. 4), состоящий из генератора 1; двойного волноводного тройника 3; аттенюатора 4; камеры, с эталонным образцом 5; фазовращателя 8; детектора 11; антенны 9 и подвижных короткозамыкателей 2, 7, 12.

Исходя из задач на контроль аномалий в изделии из композиционного материала, была разработана следующая структурная схема прибора (рис.5). Работа прибора производится следующим образом. В датчик 1, на генератор СВЧ, от блока питания 2 электронного блока 3 подается необходимое напряжение, генератор СВЧ начинает вырабатывать электромагнитные колебания. СВЧ излучение подводится к контролируемому изделию 4, взаимодействует с ним, в датчике выделяются информативные сигналы, которые подаются в усилительно-согласующий блок 5. Далее они поступают в систему контроля 1-го канала 6 и систему контроля 2-го канала 7. Далее в блок обработки 8, где вырабатывается сигнал о наличии аномалии.

Регистрация результатов контроля производится с помощью светодиодов и звуковой сигнализации.

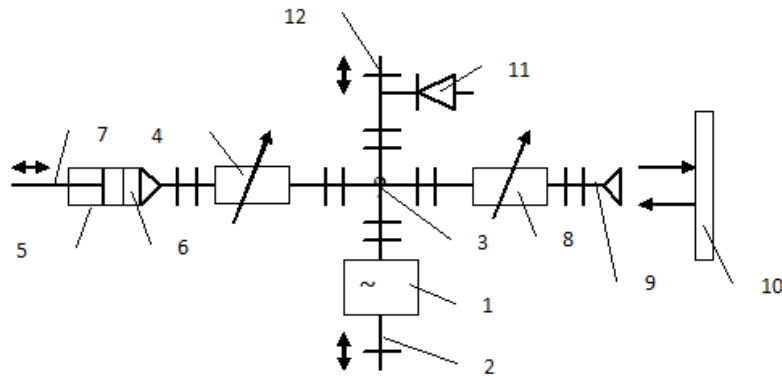


Рис. 4. Схема СВЧ-датчика с двойным волноводным тройником: 1 – генератор, 2 – подвижный короткозамыкатель, 3 – двойной волноводный тройник, 4 – аттенюатор, 5 – камера, с эталонным образцом, 6, 7 – подвижный короткозамыкатель, 8 – фазовращатель, 9 – антенна, 10 – объект контроля, 11 – детектор, с подвижным короткозамыкателем; 12 – подвижный короткозамыкатель

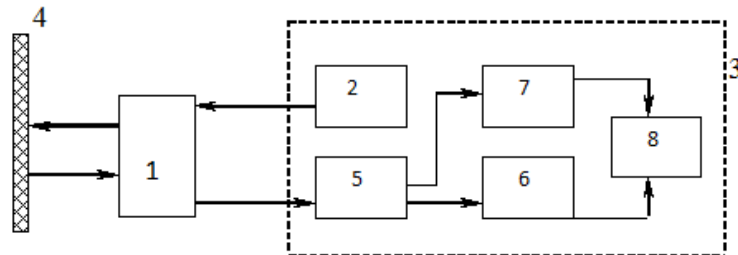


Рис. 5. Структурная схема СВЧ-прибора: 1 – датчик, 2 – блок питания, 3 – электронный блок, 4 – контролируемое изделие, 5 – усилительно-согласующий блок, 6 – система контроля 1-го канала, 7 – система контроля 2-го канала, 8 – блок обработки

Датчик прибора должен обеспечивать связь СВЧ части прибора с изделием, сохраняя ее неизменность. Он включает в себя механическую часть и СВЧ схему. Вместе с тем он должен иметь возможность перестройки волноводной части для обеспечения контроля изделий разного размера.

Механическая часть представляет собой несущий корпус, крепящийся к штанге сканирующей системы, в котором находится подпружиненный шток. На штоке закреплена схема СВЧ части датчика таким образом, что обеспечивается контакт диэлектрического волновода с поверхностью изделия.

На основании проведенной работы по разработке СВЧ схемы датчика была выбрана схема, приведенная на рис. 6. Особенностью ее является наличие второго канала измерений, состоящего из металлического волновода, установленного перпендикулярно к поверхности изделия.

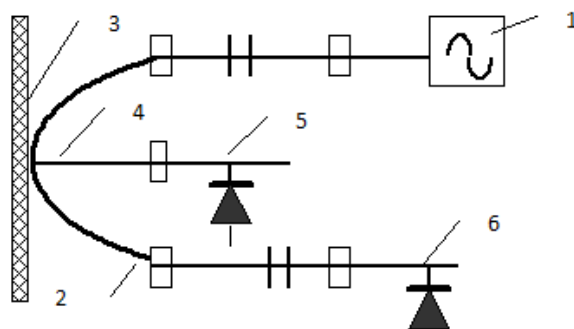


Рис. 6. Схема СВЧ части датчика: 1 – генератор СВЧ; 2 – диэлектрический волновод; 3 – контролируемое изделие; 4 – металлический волновод; 5, 6 – детектор

Работает схема следующим образом. От генератора СВЧ 1 излучение направляется в диэлектрический волновод 2, из него определенная часть попадает в контролируемое изделие 3, часть излучения попадает в металлический волновод 4. В детекторах 5 и 6 происходит детектирование электромагнитных колебаний и выделяются информативные сигналы, которые подаются в электронный блок прибора.

Для проведения экспериментальных исследований была собрана схема измерений с открытой направляющей системой (диэлектрическим волноводом) (рис. 6). В качестве генератора СВЧ колебаний использован диод Ганна типа 3А718 с длиной волны около 8 мм, схема включает в себя: вентиль волноводный типа ФВВ1-10; металлические (латунные) волноводы с внутренним размерам 7,2 x 3,4 мм, с радиусом кривизны 1,5 мм. В схеме использован детектор типа В7-27.

Оптический неразрушающий контроль (ОНК) отличается от других методов возможностью автоматизации процесса контроля, которая обеспечивается отсутствием контакта излучателя и приемника с изделием. За счет применения современных средств ОНК (излучателей и приемников), обеспечивающих высоконаправленное излучение и чувствительность – регистрацию отдельных фотонов излучения, метод может иметь высокую производительность при практически любой величине элемента разрешения. Кроме того, определяя некоторые параметры лучистого потока, такие как показатель ослабления, коэффициент прозрачности, индикатрису рассеяния и др., представляется возможным оценить качество материала в изделии как в процессе его изготовления, так и во время эксплуатации.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом отсутствуют оптические дефектоскопы для сильно рассеивающих материалов (керамика, древесина, композиты, полимеры, пеноматериалы и др.).

Выпускаемые оптические приборы (микроскопы, измерители шероховатости и др.) обеспечивают только контроль поверхности или слоев малой толщины (доли миллиметра).

Приемно-излучательный тракт в данных оптических приборах выполняется по классической схеме на отражение или прохождение, причем регистрируется прямо проходящий поток. Данные приборы не могут быть использованы для контроля сильно рассеивающих материалов, т.к. при их разработке не учитывались особенности этих материалов.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что наибольшее пропускание лучистого потока вышеуказанные материалы имеют в ближнем инфракрасном диапазоне, что делает возможным осуществить дефектоскопию изделий с толщинами до 20 мм при использовании соответствующего излучательно-приемного тракта и системы обработки принятого сигнала.

В связи с этим была поставлена задача на базе разработанных требований, создать аппаратуру инфракрасного оптического неразрушающего контроля (ИОНК) изделий из сильно рассеивающих электронепроводящих материалов (кварцевая керамика, пороматериалы, композиты и др.). Причем данная аппаратура должна реализовывать двухсторонний ИОНК изделий цилиндрической, конусной и плоской форм.

Для практической реализации оптической дефектоскопии на прохождение, в Горном университете на кафедре приборостроения была разработана установка, структурная схема которой представлена на рис. 7.

В состав приемно-излучательного тракта дефектоскопа входят элементы излучателя: источник излучения, блок питания излучателя, объективы, электронный модулятор; элементы приемника: объектив с регулируемой полевой диафрагмой, фотоприемник, блок питания, генератор, измерительный усилитель.

В качестве источника излучения в приемно-излучательном тракте используется лампа накаливания или светодиод. В качестве фотоприемников используется фотоэлектронный умножитель или фотодиод. В составе структурной схемы дефектоскопа должна быть жесткая несущая штанга, на которой закрепляются излучатель и приемник.

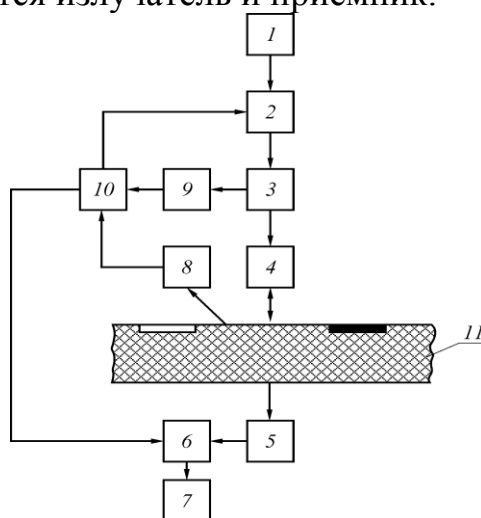


Рис. 7. Структурная схема ИК-дефектоскопа

Структурная схема дефектоскопа приведена на рис. 7. Дефектоскоп содержит источник излучения 1, затвор 2, распределительное устройство (призма) 3, оптическая система 4, приемник прошедшего излучения 5, усилитель 6, блок обработки и регистрации (компьютер) 7, приемник отраженного рассеянного излучения 8, преобразователь 9, коммутатор 10.

Система работает следующим образом. Излучение от источника 1 через затвор 2 и призму 3 попадает в оптическую систему 4, которая направляет его на изделие 11. Прошедшее сквозь изделие излучение попадает на приемник прошедшего излучения 5, где преобразуется в электрический сигнал, который поступает на усилитель 6 и далее в блок обработки и регистрации (компьютер) 7. Если рассеянное излучение отсутствует, то коммутатор 10 подключает выход приемника отраженного излучения 8 к управляющему входу усилителя 6. В этом случае отраженное от поверхности излучение попадает через призму 3 в преобразователь 9, где преобразуется в электрический сигнал и далее через коммутатор 10 на управляющий вход усилителя 6, увеличивая усиление усилителя, если отраженный сигнал увеличивается и уменьшая его, если отраженный сигнал уменьшается. Если имеется рассеянное излучение, то коммутатор 10 выход приемника отраженного излучения 8 подключает к управляющему входу затвора 2. В этом случае отраженное от поверхности излучение поступает на приемник отраженного излучения 8 и коммутатор 10 поступает на управляющий вход затвора 2, увеличивая мощность падающего потока до тех пор, пока отраженный сигнал не будет равен опорному отраженному сигналу (т.е. сигналу участка без аномалий).

Для подтверждения работоспособности предлагаемой аппаратуры были проведены испытания экспериментального образца. В результате было получено несколько дефектограмм образцов стеклопластика с заложенными дефектами. Как отмечалось выше, для получения дефектограмм можно использовать системы с построчным сканированием с записью результатов на электрохимическую бумагу, а также систему регистрации с телевизионной камерой. Выбор системы визуализации зависит от толщины контролируемого изделия. Для малых толщин можно использовать телевизионный регистратор, а для больших – систему построчного сканирования.

На рис. 8–11 приведены дефектограммы образцов стеклопластика, полученные путем построчного сканирования. Для получения дефектограммы рис. 1 использована сканирующая система качающейся развертки.

На рис. 8 приведена дефектограмма трехслойной сотовой панели из стеклопластика, полученная оптическим ИК-методом, темные участки – непрочной сотовой панели к обшивке панели. Внизу видно искусственное расслоение, прорезанное ножом.

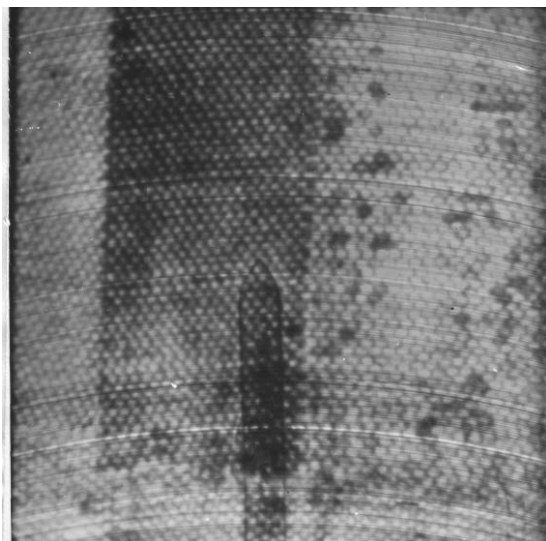


Рис. 8. Дефектограмма трехслойной сотовой панели

На рис. 9 приведена дефектограмма плиты стеклопластика толщиной 15 мм. Видны естественные складки в слоях, полученные при прессовании плиты, темные участки – повышенная пористость.

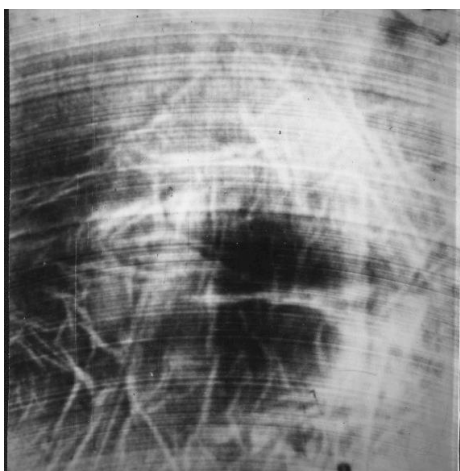


Рис. 9. Дефектограмма плиты стеклопластика

На рис. 10 приведена дефектограмма плиты из пенополистирола толщиной 25 мм, темные участки – с повышенным содержанием пор.

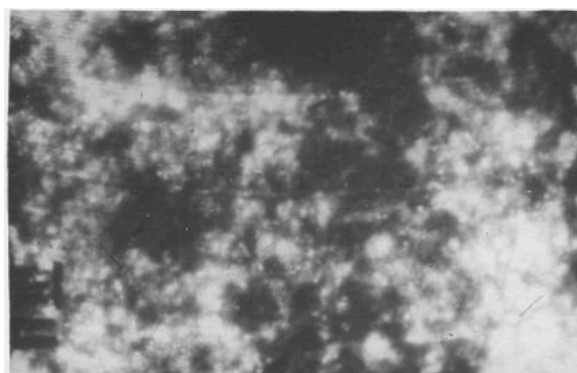


Рис. 10. Дефектограмма плиты из пенополистирола

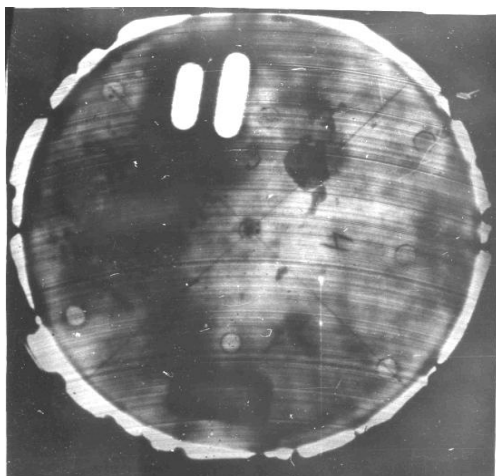


Рис. 11. Дефектограмма круглой плиты из стеклопластика

На рис. 11 приведена дефектограмма круглой плиты из стеклопластика толщиной 25 мм, полученная оптическим ИК-методом. Два светлых участка на дефектограмме обозначают отверстия в плите, темный участок рядом – зона повреждения материала при механической обработке, другие темные участки – места высокой пористости.