

УДК 620.179

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

© А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин¹*Статья поступила 7 октября 2016 г.*

Изложена методика измерений скорости распространения продольных ультразвуковых волн в слоистых композиционных материалах по наклонным к поверхности материала траекториям. Измерения выполнены с применением ультразвуковых пьезопреобразователей с сухим точечным контактом. Показано, что с увеличением угла отклонения траектории от нормали к поверхности скорость в материале монотонно возрастает по закону, близкому к зависимости длины радиуса эллипса от угла между радиусом и малой полуосью. Полученные данные следует учитывать при разработке алгоритмов визуализации внутренней структуры композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы; углепластики; стеклопластики; ультразвуковые волны; продольные волны; преобразователи с сухим точечным контактом; скорость распространения; эхометод; антенная решетка.

Слоистые композиционные материалы (КМ) широко применяются в авиационной и космической технике, судостроении и других отраслях промышленности. Наиболее распространены угле- и стеклопластики, углерод-углеродные материалы. Конструкции из них при высокой прочности существенно легче металлических.

При производстве и эксплуатации в изделиях из слоистых КМ возникают внутренние дефекты — расслоения, инородные включения, пористости, завороты слоев, трещины различной ориентации и др. Поэтому изделия подвергают тщательному и многократному неразрушающему контролю [1]. Причем цель контроля заключается не только в обнаружении дефектов, но и определении возможности их устранения теми или иными технологическими приемами.

Для дефектоскопии изделий из КМ часто используют акустические методы неразрушающего контроля. Наиболее информативный и универсальный из них — эхо-метод, чувствительный к различным дефектам структуры материала. Высокая производительность контроля достигается благодаря использованию антенных решеток в аппаратуре, визуализирующей внутреннюю структуру материала изделия.

Некоторые дефекты, например, трещины, проходящие сквозь слои, или расслоения в зонах Т-образных соединений обшивок и стрингеров, могут быть ориентированы случайным образом, а не только параллельно внешней поверхности изделия. Обнаружить такие дефекты можно при нормальном падении на них ультразвуковых (УЗ) волн, так как типичные размеры дефектов в несколько раз больше длины волны и отражение от них должно быть зеркальным.

Из этого следует, что наряду с излучением и приемом продольных волн по нормали к внешней поверхности, что обычно применяют в существующей практике УЗ-контроля слоистых КМ, необходимо использовать наклонное распространение ультразвука в материале.

Большинство слоистых КМ имеют ортотропную структуру. Реже встречается трансверсально-изотропное строение материала. Эксперименты по измерению скоростей распространения продольных УЗ-волн показывают, что обычно скорость в направлении, перпендикулярном слоям, например углепластика, составляет 2800 – 3200 м/с, а в двух других направлениях — 4500 – 9000 м/с и выше. Скорости, как правило, не равны между собой из-за разного количества слоев волокон с одинаковым направлением укладки. Таким образом, скорость распространения продольных УЗ-волн должна сильно зависеть от угла между нормалью к поверхности материала и направлением распространения волны.

Цель работы — определение зависимости скорости ультразвука в материале от направления его распространения сквозь слои КМ при наклонном вводе УЗ-волны.

Пусть ось Z ортогональной системы координат направлена перпендикулярно поверхности ортотропного материала, а оси X и Y — вдоль нее. Обозначим скорости распространения сигнала в направлении осей в материале соответственно c_z , c_x , c_y . Тогда из общих физических представлений можно предположить, что скорость распространения сигнала под произвольным углом к осям, например X и Z (в плоскости XZ), должна лежать между c_x и c_z при условии монотонной ее зависимости от угла между направлением распространения сигнала и одной из осей. А форма зависимости от направления должна быть близка к эл-

¹ ООО «Акустические контрольные системы», Москва, Россия; e-mail: shev@acsys.ru

липтической (скорость численно равна радиусам эллипса, полуоси которого — граничные скорости распространения сигнала в направлении осей c_z и c_x). Так, например, если в углепластике $c_z = 3000$ м/с приравнять к малой полуоси эллипса, а $c_x = 6000$ м/с — к большой, то скорость в направлении 45° к осям эллипса будет численно равна половине диаметра эллипса, проведенного под углом 45° к его осям. Исходя из уравнения эллипса, она составит 3795 м/с (дополнительные эффекты рассеяния и трансформации волн при переходе наклонно падающей волны через слои материала здесь, конечно, не учитываются).

Сделанное предположение проверили экспериментально при измерениях скорости наклонного распространения продольной УЗ-волны в образцах из стекло- и углепластика, слоистого углерод-углеродного материала (см. таблицу). Образцы углепластика отличались друг от друга количеством слоев и порядком их укладки. Скорости c_z и c_x измеряли соответственно в направлении перпендикулярно и вдоль слоев материала.

Измерения проводили методом сквозного прозвучивания образца с помощью УЗ-преобразователей с сухим точечным контактом [2]. Один из преобразователей оставался неподвижным, а другой перемещали по поверхности образца вдоль прямой по разметке от точки их соосного расположения до положений, при которых траектории прохождения сигнала отклонялись от нормали на углы примерно 60° .

Преобразователи использовали, поскольку были необходимы точки акустического контакта (базы прозвучивания составляли всего несколько миллиметров). Площадь контактного наконечника преобразователя не превышала 1 мм^2 . Вследствие низкого уровня принимаемого сигнала требовалась хорошая развязка излучающего и приемного устройств для устранения электрической наводки импульса возбуждения на приемный преобразователь.

Длительность импульса возбуждения прямоугольной формы составляла 1 мкс, амплитуда импульса — 200 В, коэффициент усиления приемного усилителя — 60 дБ, полоса пропускания усилителя — 40 Гц – 200 кГц.

Отсчет времени прихода зондирующего сигнала на приемный преобразователь в большинстве случаев производили по минимальному превышению фронта сигнала над шумами. Использовать другие способы отсчета времени при отклонении траектории прохождения сигнала от нормали к поверхности образца до углов порядка 40° , было невозможно, так как на приемнике действовала сумма сигналов продольной и значительно большего по амплитуде сигнала поверхностной волн. При углах, больших 40° , измерение по порогу, нормированному на максимум сигнала, как правило, приводило к большой погрешности.

Длительность задержки сигнала (она составила 1,85 мкс) в измеряемом интервале учитывали установ-

кой начального момента измерений при непосредственном совмещении контактных наконечников преобразователей. Дискретность отсчетов времени не превышала 10 нс.

Результаты измерений скорости приведены на рис. 1. Сплошные линии показывают расчетные зависимости скорости c наклонного распространения продольных волн от угла α отклонения их траекторий от нормали к поверхности образца. В расчетах использовали формулу

$$c = c_z \left[1 - \sin 2\alpha \left(1 - \frac{c_z^2}{c_x^2} \right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

зависимость длины радиуса эллипса от угла между ним и малой полуосью c_z (большая полуось — c_x). Для всех образцов измеренные скорости оказались меньше расчетных.

На рис. 2 приведены наибольшее и наименьшее относительные отклонения измеренных скоростей от расчетных (образцы 1 и 2, см. таблицу).

Видно, что при увеличении угла прозвучивания α амплитуда принятого сигнала быстро уменьшается из-за влияния диаграмм направленности точечных излучателя и приемника и увеличения расстояния между преобразователями. Поэтому определить точку отсчета времени на фронте сигнала становится все труднее, что повышает погрешность измерения. Попытка измерить время задержки по максимуму первой полуволны сигнала не дала заметного уменьшения погрешности. Результаты практически совпали с измерениями по минимальному порогу (см. рис. 1, б, светлые кружки).

Возможно, что занижение измеренной скорости (относительно расчетной) связано с влиянием границ слоев материала. В некоторой степени это подтверждает эксперимент с углерод-углеродным образцом (см. рис. 1, а, кривая 2), в котором явные границы между слоями отсутствуют (здесь отклонение минимальное, см. рис. 2).

Наряду с полезным сигналом продольной УЗ-волны на противоположной поверхности пластины из исследуемого материала всегда возникает импульс поверхностных волн, расходящихся во все стороны от точки падения на поверхность фронта продольной волны изнутри материала. Эта точка находится строго напротив излучающего преобразователя. Если, например, к поверхности материала подходит волна сжатия, то на поверхности появляется смещение материала,

Характеристики образцов

Образец	Материал	Толщина, мм	c_z , м/с	c_x , м/с
1	Углепластик	17,75	2690	8800
2	Углерод-углеродный	23,3	1470	6290
3	Углепластик	14,15	2940	7240
4	Стеклопластик	6,0	2680	5210

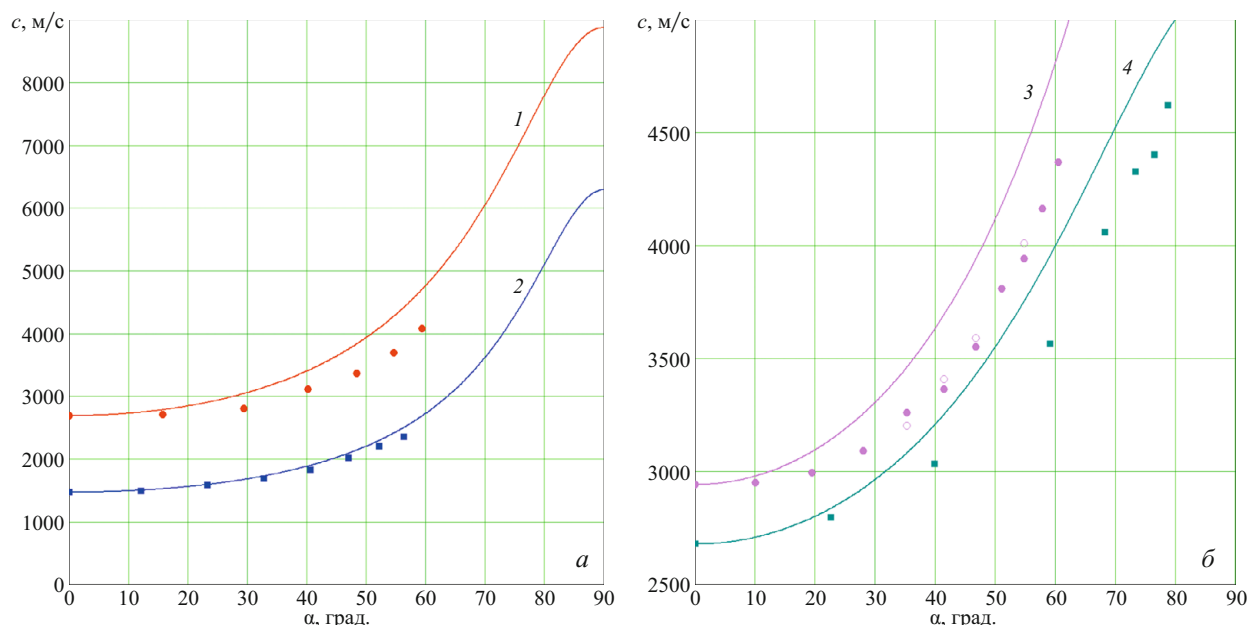


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости распространения продольных волн от угла отклонения траектории от нормали к поверхности для образцов 1, 2 (а) и 3, 4 (б)

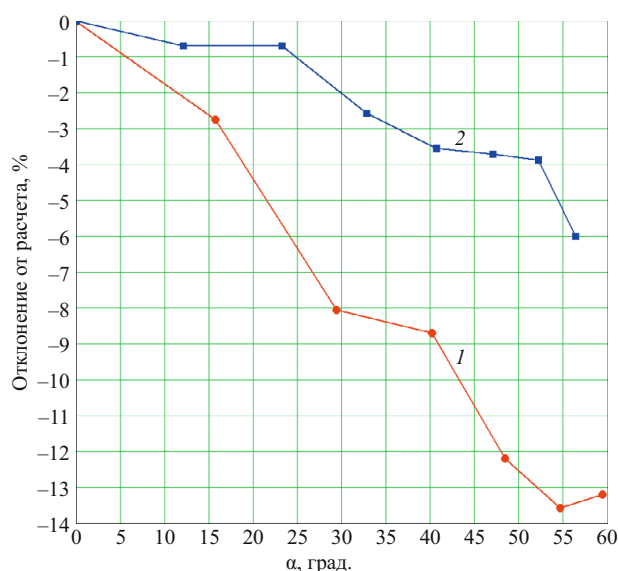


Рис. 2. Относительные отклонения результатов измерений скорости от расчетных значений для образцов 1 (кривая 1) и 2 (кривая 2)

направленное наружу, т.е. поверхность на короткое время становится выпуклой. При этом расходящиеся от нее волны по мере удаления переходят в волны Лэмба, если толщина пластины соизмерима с длиной волны. В частности, скорость распространения поверхностной волны для углепластика (образец 3) составила около 2230 м/с.

На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов на выходе приемного усилителя при разных углах прозвучивания (образец 3). Видно, что в точке приема сигналов действует сумма импульсов продольной и поверхностной волн. Причем первая полуволна сигнала

поверхностной волны примерно в 25 – 40 раз больше первой полуволны сигнала продольной. При соосном расположении преобразователей ($\alpha = 0$) оба сигнала совпадают во времени (осциллограмма 1). По мере удаления точки приема сигналов от начальной точки ($\alpha = 0$) импульс поверхностной волны все больше отстает от импульса продольной, приходящей в точку приема по кратчайшей траектории. Только при угле прозвучивания $\alpha = 35^\circ$ фронт сигнала поверхностной волны оказывается позже максимума первой полуволны сигнала продольной (осциллограмма 2). Соотношение амплитуд сигналов можно оценить по осциллограмме 4, а скорость уменьшения амплитуды сигнала продольной волны с ростом угла α — по осциллограммам 2 – 4. В интервале углов 35 – 55°, в которой амплитуду можно было измерить, она уменьшилась примерно в три раза.

Выбранный масштаб по вертикали (см. рис. 3) использовали для оценки соотношений между сигналами продольной и поверхностной волн. При измерениях времени он составлял 1 мВ/дел.

Таким образом, из полученных данных можно заключить, что, во-первых, зависимость скорости продольной волны в слоистых КМ от наклона траектории ее распространения близка к «эллиптическому» закону. И это необходимо учитывать в алгоритмах реконструкции изображений визуализирующих дефектоскопов. Во-вторых, амплитуда сигнала достаточно быстро уменьшается при отклонении траектории распространения волны от нормали (при контроле эхо-методом скорость этого уменьшения удваивается), что также требует учета при реконструкции изображений. В противном случае наклонные лучи не будут давать полноценного вклада в яркость образов отражателей.

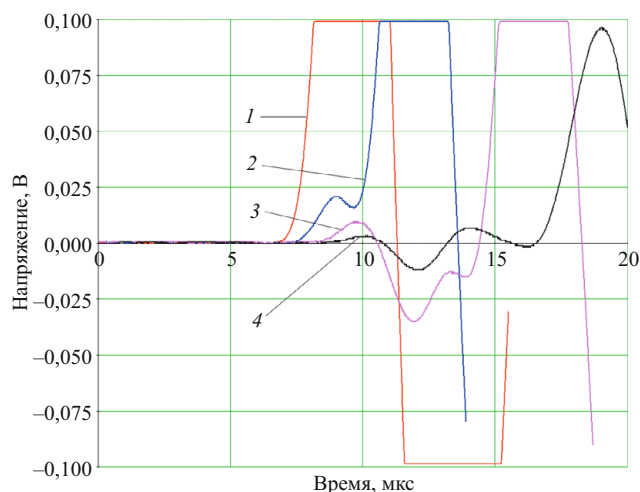


Рис. 3. Осциллограммы сигналов на выходе приемного усилителя при прозвучивании образца 3 при прохождении сигнала по нормали к поверхности образца (1) и под углами 35 (2), 47 (3) и 55° (4)

На рис. 4 приведено изображение сечения дефектного соединения углепластиковой обшивки крыла самолета со стрингером, полученное с помощью антенной решетки (16 элементов, составляющих апертуру 40 мм; рабочая частота — 4 МГц) продольных волн на визуализирующем дефектоскопе А1550 [3].

На изображении с экрана дефектоскопа (см. рис. 4, а) только горизонтальные части выпуклого расслоения дали образы красного цвета (высокий уровень сигнала). Наклонная часть расслоения (2 – 5 мм по оси X) слабо прорисована вследствие отклонения падающих на нее лучей от вертикали (лучи приходят к антенной решетке, но не вносят почти никакого вклада в уровень сигнала образа дефекта).

Учет изложенных в работе эффектов в алгоритмах работы приборов позволит улучшить качество изображений, что повысит информативность контроля изделий из слоистых пластиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль композиционных материалов: сб. тр. 1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов». — СПб.: СВЕН, 2015. — 228 с.
2. Шевалдыкин В. Г., Самокрутов А. А., Козлов В. Н. Новые аппаратно-методические возможности ультразвукового прозвучивания

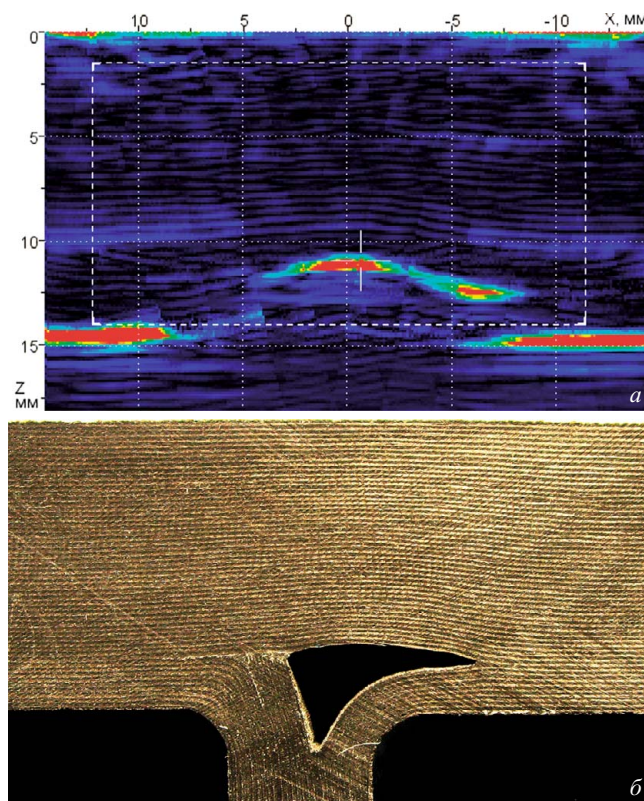


Рис. 4. Изображение с экрана ультразвукового дефектоскопа А1550 (а) при расположении антенной решетки на поверхности панели из углепластика над расслоением в зоне соединения обшивки со стрингером (б)

композиционных и пластмасс / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1998. Т. 64. № 4. С. 29 – 39.

3. Средства акустического контроля. Технический справочник. — СПб.: СВЕН, 2008.

REFERENCES

1. Nerauzhshayushchii kontrol' kompozitsionnykh materialov [Non-Destructive Testing of Composite Materials]: Proc. of the 1st remote scientific conference NKKM 2014 "Devices and methods of non-destructive quality control of products and structures made of composite and non-uniform materials." — St. Petersburg: SVEN, 2015. — 228 p. [in Russian].
2. Shevaldykin V. G., Samokrutov A. A., Kozlov V. N. Novye apparaturno-metodicheskie vozmozhnosti ul'trazvukovogo prozvuchivaniya kompozitov i plastmass [New apparatus-systematic possibilities of ultrasonic irradiation of composites and plastics] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1998. Vol. 64. N 4. P. 29 – 39.
3. Sredstva akusticheskogo kontrolya [Means of acoustic control]. Technical reference. — St. Petersburg: SVEN, 2008 [in Russian].