## УДК 620.179 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ АНИЗОТРОПИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИЗДЕЛИИ

## А. И. ПОТАПОВ ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ» Санкт-Петербург, Россия

Одним из достоинств композитов как конструкционных материалов является то обстоятельство, что в этих материалах можно закладывать необходимые параметры физико-механических свойств в любом направлении и участке изделия в процессе его изготовления. Управление свойствами композиционных материалов осуществляется в результате выбора оптимальных технологических режимов или путем регулирования содержания и ориентации наполнителя в определенных структурных направлениях. При этом в композиционных материалах с направленной ориентацией анизотропия зависит от способа укладки стеклопакетов с заложенной ориентацией волокна.

В композиционных материалах на основе рубленого волокна ориентация наполнителя может происходить самопроизвольно, что приводит к неравномерной анизотропии в различных участках изделия. Кроме того, в процессе формования изделий из композиционных материалов может происходить смещение, раздвижка и поворот наполнителя, что приводит к изменению заложенной анизотропии.

Для оценки и неразрушающего контроля установившейся анизотропии наиболее оптимальным является импульсный ультразвуковой метод. С помощью этого метода можно определить как преобладающую ориентацию наполнителя, так и анизотропию композиционного материала. При этом направление с максимальными значениями физико-механических свойств совпадают с направлением преобладающей ориентации наполнителя.

Большинство типов композиционных материалов, обладающих существенной анизотропией, являются ортогонально-анизотропными, т. е. волокна расположены в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлением осей упругой симметрии.

Подобные композиционные материалы относят к продольнопоперечной структуре (ППС). Максимальной анизотропией и степенью ориентации обладает однонаправленный композиционный материал.

В результате экспериментально-теоретических исследований композиционных материалов продольно-поперечной структуры установлено, что степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном композиционном материале – величина постоянная и не зависит от содержания наполнителя в диапазоне 50–80 %.

Используя импульсный ультразвуковой метод, представляется возможным непосредственно в изделии из композиционного материала ППС определить степень ориентации по следующей формуле:

$$m = \frac{\lambda_0 \lambda_{B\Pi} - 1}{\lambda_0 \lambda_{\Pi\Pi} - \lambda_{\Pi\Pi} + \lambda_0 - 1}, \qquad (1)$$

где  $\lambda_0 = v_0/v_{90}$  – степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном композиционном материале;  $\lambda_{nn}$  – степень анизотропии скорости в исследуемом композиционном материале ППС;  $v_0$  и  $v_{90}$  – скорость продольных волн вдоль и поперек волокон.

Следует отметить, что значение  $\lambda_{nn}$  определяется экспериментально путем измерения скорости продольных волн в двух направлениях: вдоль и поперек волокон. Определение степени ориентации наполнителя в неориентированных композиционных материалах является значительно более трудной задачей. Расположение рубленого наполнителя в неориентированном композиционном материале зависит от режима технологии изготовления, конфигурации и габаритов изделия, длины волокна и других факторов.

Существенное влияние на физико-механические свойства неориентированных композиционных материалов оказывает ориентация наполнителя. Наиболее эффективным методом контроля степени ориентации в этих материалах также является импульсный ультразвуковой метод.

Для определения степени ориентации наполнителя в неориентированных композиционных материалах предлагается следующая зависимость:

$$q = \frac{(\lambda_0 + 1)(\lambda_x - 1)}{(\lambda_0 - 1)(\lambda_x + 1)}, \qquad (2)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_x$  – степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном и неориентированном композиционных материалах.

Данное выражение получено на основании предпосылки, что однонаправленная структура обладает 100-процентной степенью ориентации, и степень анизотропии скорости однонаправленного композиционного материала не изменяется в диапазоне содержания наполнителя, равном 45–85 %. Теоретическое значение степени анизотропии однонаправленного композиционного материала составляет 1,67, Тогда данное выражение (2) можно упростить:

$$q = \frac{4 \left(\lambda_x - 1\right)}{\lambda_x + 1} \,. \tag{3}$$

Следует отметить, что степень ориентации в неориентированных композиционных материалах определяется при прозвучивании не менее чем в трех структурных направлениях, в то время как в ориентированных композиционных материалах достаточно провести испытания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлением волокон.

Полученные выражения (1–3) предполагают определение интегральной степени ориентации, т. е. усредненное значение относительного количества наполнителя с ориентацией вдоль соответствующего структурного направления, совпадающего с направлением испытания.

Для определения локальной ориентации наполнителя или определения направления преобладающей анизотропии материала могут быть использованы поляризационные методы. Наиболее эффективными в этом отношении могут быть ультразвуковые, микрорадиоволновые и инфракрасные поляризационные методы.

Применение этих методов основано на вращении плоскости поляризации излучения, прошедшего через анизотропную среду, в исследуемом участке среды. При этом интенсивность прошедшего или отраженного излучения (ультразвукового или электромагнитного) зависит от угла между направлением преобладающей ориентации и направлением поляризации волны в поляризаторе и анализаторе. Интенсивность прошедшего излучения через изотропную среду или в воздухе, при скрещенных поляризаторе и анализаторе, равно 0 или зависит от степени и вида поляризации используемого излучения и состояния среды.

В общем случае интенсивность прошедшего поляризованного излучения при повороте скрещенных поляризатора и анализатора выглядят так:

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2} , \qquad (4)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего поляризованного излучения после поляризатора;  $\alpha$  – угол между направлением плоскости поляризации волны в поляризаторе и направлением преобладающей ориентации наполнителя;  $\delta$  – разность фаз.

Значение разности фаз можно найти при известных значениях скоростей распространения волн (упругих или электромагнитных) вдоль соответствующих направлений в поляризаторе и анализаторе:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} \left( \frac{v_0}{v_2} - \frac{v_0}{v_1} \right),\tag{5}$$

где h – толщина исследуемой среды;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $v_0$  – скорость распространения поляризованного излучения в воздухе или в материале акустического контакта для ультразвука;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости поляризованного излучения (для ультразвука – скорость поперечных волн) вдоль направления с преобладающей ориентацией и перпендикулярно к нему.

Произведя несложные преобразования в формулах (4,5), получим следующее выражение для определения а:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \frac{1}{I_0 \sin^2 \frac{\pi h}{\lambda} \left(\frac{v_0}{v_2} - \frac{v_0}{v_1}\right)}.$$
 (6)

Таким образом, зная h и  $\lambda$ , а также измерив, интенсивность излучения после поляризатора и анализатора и значения соответствующих скоростей, получим направление преобладающей ориентации наполнителя в композиционных материалах.

Экспериментальное определение степени ориентации производилось на ориентированных и неориентированных композиционных материалах типа – стеклопластик. Для проведения испытаний и экспериментальной проверки формулы были изготовлены ориентированные стеклопластики на основе эпоксифенольного связующего ИФ-ЭД-6 кг с различным соотношением волокон в продольном и поперечном направлениях, с весовым содержанием стекла 75 %.

Ультразвуковые испытания проводились на плитах размером 500×500 ×5 мм по ранее приведенной методике. Результаты ультразвуковых испытаний и расчетов приведены в табл. 1.

Тип	Скорость про-		Степень	Относительное содержание во-				
стеклопластиков	дольных волн, м/с		анизо-	локна с ориентацией в направле-				
			тропии	ии нии				
	вдоль	поперек	скорости	продольном		поперечном		
	волокон	волокон		экспе-	ПО	экспе-	ПО	
				римен-	паспор-	римен-	паспорту	
				тально	ту	мен-		
1:1	4250	4220	1,005	0,500	0,500	0,500	0,500	
1:2	4510	3900	1,155	0,656	0,667	0.344	0,333	
1:3	4630	3760	1,231	0,726	0,750	0,274	0.250	
1:4	4680	3700	1,264	0,756	0.800	0,244	0,200	
1:5	4700	3640	1.291	0,770	0,833	0,230	0,167	
1:10	4920	3500	1,405	0,867	0,909	0,133	0,091	
1:15	4980	3370	1,477	0,920	0,938	0.080	0,062	
Однонаправлен-	5100	3200	1,594	1,00	1,00	0,00	0,00	
ные								

Табл. 1. Значения ориентации стеклонаполнителя в стеклопластиках, с продольно-поперечной укладкой волокна

Из табл. 1 видно, что экспериментальные значения ориентации незначительно отличаются от паспортных характеристик. Для оценки анизотропии скорости продольных волн и модуля упругости также проводились ультразвуковые испытания выше указанных плит путем их прозвучивании под углом 15° к направлению стекловолокна.

Результаты исследования анизотропии скорости продольных волн

приведены на рис. 1.



Рис. 1. Анизотропия скорости продольных волн для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

Видно, что в зависимости от степени ориентации стеклопластика полярные диаграммы скорости претерпевают существенные изменения. Однако в результате экспериментальных исследований было установлено, что скорость продольных волн под углом 45° к направлению волокон имеет общее значение для всех стеклопластиков и не зависит от соотношения волокон в продольном н поперечном направлениях. Аналогичные результаты были получены и в отношении статического и динамического модулей упругости (рис. 2).

Для определения степени ориентации хаотического стеклонаполнителя были также проведены ультразвуковые испытания плит неориентированного стеклопластика ДСВ-2-Р-2М на основе фенолформальдегидного связующего с весовым содержанием стекла 62–64 %.



Рис. 2. Анизотропия статического и динамического модулей упругости для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

Кроме стеклопластиков с хаотическим расположением стеклонаполнителя, были изготовлены плиты, в которых степень ориентации создавалась по технологии, разработанной институтом ВНИИСПВ. Некоторые результаты исследования интегральной степени ориентации в данных стеклопластиках приведены в табл. 2.

Табл. 2. Экспериментальные значения степени ориентации в неориентированных стеклопластиках

Степень заданной	скорость п	родольных	степень	степень	
ориентации, %	ВОЛН	н. <i>м/с</i>	анизотропии	ориентации	
	вдоль	поперек	скорости	определенная	
	волокон	волокон		экспериментом	
100	4410	3160	1,39	65	
0	4060	3340	1,21	25,4	
25	3730	3480	1,07	13,5	
Хаотическая	3630	3660	1,005	1,0	
структура					

Приведенные результаты показывают, что между задаваемой ориентацией стеклонаполнителя и реальной, определенной экспериментально, имеется существенное различие. Это различие обусловлено, вероятно, большими трудностями обеспечения направленного расположения рубленого наполнителя в стеклопластиках.

Таким образом, импульсный ультразвуковой метод является эффективным средством для количественной оценки степени анизотропии стеклопластика непосредственно в изделиях.