УДК 620.179

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ АНИЗОТРОПИИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИЗДЕЛИИ

А.И.ПОТАПОВ, *д-р техн. наук*, *профессор*, *apot@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена методика неразрушающего контроля анизотропии композиционных материалов в изделии с использованием импульсного ультразвукового метода. Приведены расчетные зависимости для определения степени ориентации наполнителя в полимерном композиционном материале с различной укладкой наполнителя: хаотичной, продольно-поперечной, однонаправленной, а также экспериментальные результаты контроля анизотропии модуля упругости в стеклопластиках с различной степенью анизотропии импульсным ультразвуковым методом.

***Ключевые слова*:** неразрушающий контроль, импульсный ультразвуковой метод, модуль упругости, композиционные материалы, анизотропия, ориентация наполнителя.

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 пакетов с заложенной ориентацией волокна [2, 11].

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 совпадает 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 продольно-поперечной 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 [3-6, 13], представляется возможным непосредственно в изделии из композиционного материала ППС определить степень ориентации по формуле

$$m = \frac{\lambda_0 \lambda_{пп} - 1}{\lambda_0 \lambda_{пп} - \lambda_{пп} + \lambda_0 - 1}, \quad (1)$$

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

Следует отметить, что значение $\lambda_{пп}$ 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 зависимость:

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

где λ_0 и λ_x – степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном и неориентированном композиционных материалах.

Выражение (2) 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 выражение (2) можно упростить:

$$q = \frac{4(\lambda_x - 1)}{\lambda_x + 1}. \quad (3)$$

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 направления преобладающей анизотропии материала могут быть использованы поляризационные методы. Наиболее эффективными в этом отношении могут быть ультразвуковые, микрорадиоволновые и ин-

фракрасные 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 нулю 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

$$I = \frac{I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \delta}{2}, \tag{4}$$

где I_0 – интенсивность падающего поляризованного излучения после поляризатора; α – угол между направлением плоскости поляризации волны в поляризаторе и направлением преобладающей ориентации наполнителя; δ – 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; λ – 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) и (5), получим следующее выражение для определения α:

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

Таким образом, зная h и λ, 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. 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 плит путем их прозвучивании под углом 15° к направлению стекловолокна.

Таблица 1

Значения ориентации стеклонаполнителя в стеклопластиках с продольно-поперечной укладкой волокна

Тип стеклопластиков	Скорость продольных волн, м/с		Степень анизотропии скорости	Относительное содержание волокна с ориентацией в направлении			
	вдоль волокон	поперек волокон		продольном		поперечном	
				экспериментально	по паспорту	экспериментально	по паспорту
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
Однонаправленные	5100	3200	1,594	1,00	1,00	0,00	0,00

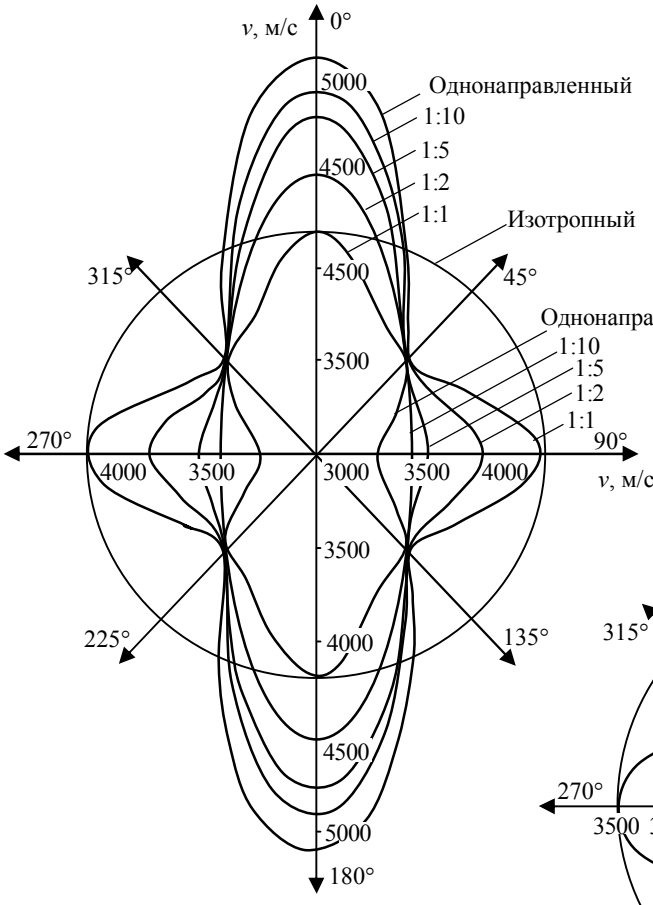


Рис.1. Анизотропия скорости продольных волн для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

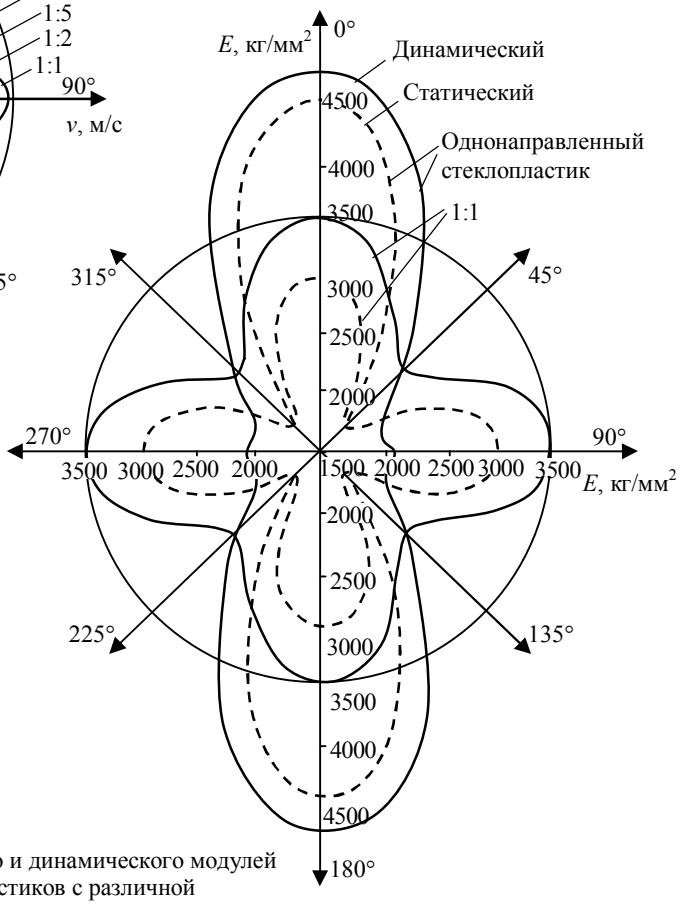


Рис.2. Анизотропия статического и динамического модулей упругости для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

Результаты исследования анизотропии скорости продольных волн приведены на рис.1. 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 и 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 %.

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

Таблица 2

Экспериментальные значения степени ориентации в неориентированных стеклопластиках

Степень заданной ориентации, %	Скорость продольных волн, м/с		Степень анизотропии скорости	Степень ориентации, определенная экспериментом
	вдоль волокон	поперек волокон		
100	4410	3160	1,39	65
60	4060	3340	1.21	25.4
25	3730	3480	1,07	13,5
Хаотическая структура	3630	3660	1,005	1,0

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.

Следует отметить, что в результате выполненных ранее исследований было установлено, что анизотропия скорости ультразвука существенно влияет на результаты акустико-эмиссионного контроля [7-10, 12, 14, 15]. Полученные результаты позволяют учесть это влияние.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В.В.Носов, А.И.Потапов, И.Н.Бураков // Дефектоскопия. 2009. № 2. С.47-57.

2. *Потапов А.И.* Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1977. 192 с.

3. *Потапов А.И.* Определение модуля упругости двухкомпонентной гетерогенной смеси с учетом степени диспергирования // Механика композитных материалов. 1981. № 5. С.37-43.

4. *Потапов А.И.* Применение импульсных низкочастотных УЗ методов для контроля качества изделий из крупноструктурных материалов // Дефектоскопия. 1979. № 7. С.46-50.

5. *Потапов А.И.* Прогнозирование опасного повреждения в образцах и тонкостенных элементах конструкции при циклическом нагружении // Дефектоскопия. 1990. № 10. С.47-52.

6. *Потапов А.И.* Прохождение ультразвукового импульса через слой с затуханием при бесконтактном теневом контроле // Дефектоскопия. 1990. № 10. С.41-46.

7. *Потапов А.И.* О выборе подхода к разработке методов НК прочности изделий на основе использования явления акустической эмиссии / А.И.Потапов, В.В.Носов // Дефектоскопия. 1996. № 6. С.39-44.

8. *Потапов А.И.* Структурно-имитационная модель параметров акустической эмиссии / А.И.Потапов, В.В.Носов // Дефектоскопия. 1996. № 6. С.30-38.

9. *Потапов А.И.* Оценка прочности корпусных изделий при их гидроиспытаниях по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии / А.И.Потапов, В.В.Носов // Дефектоскопия. 1998. № 5. С.99-107.

10. *Потапов А.И.* Акустоэмиссионный контроль несущей способности мерзлых оснований сооружений и принципы построения автоматизированных диагностических систем / А.И.Потапов, И.В.Павлов // Дефектоскопия. 1995. № 10. С.51-59.

11. *Потапов А.И.* Прочность и деформативность стеклопластиков (контроль в конструкции) / А.И.Потапов, Г.М.Савицкий. Л.: Стройиздат, 1973. 144 с.

12. Принципы подбора акустоэмиссионных показателей прочности конструкционных материалов / А.И.Потапов, В.А.Петров, В.В.Носов, И.В.Павлов // Дефектоскопия. 1995. № 5, С.57-62.

13. *Сборовский А.К.* Ультразвуковой контроль качества конструкций / А.К.Сборовский, А.И.Потапов, В.Е.Поляков. Л.: Судостроение, 1978. 200 с.

14. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Choosing an approach for developing methods for nondestructive testing of the strength of articles based on the acoustic emission phenomenon // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Vol.32. N 6, p.459-463.

15. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Structural simulation model for acoustic emission parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Vol.32. N 6, p.451-458.

REFERENCES

1. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.*, *Burakov I.N.* Ocenka prochnosti i resursa tehnicheskih ob′ektov s pomoshh'ju metoda akusticheskoj jemissii (*Evaluation of strength and resources of technical objects with the help of acoustic emission method*). Defektoskopija. 2009. N 2, p.47-57.

2. *Potapov A.I.* Nerazrushajushhij kontrol' konstrukcij iz kompozicionnyh materialov (*Non-destructive testing of structures made of composite materials*). Leningrad: Mashinostroenie, 1977, p.192.

3. *Potapov A.I.* Opredelenie modulja uprugosti dvuhkomponentnoj geterogennoj smesi s uchetom stepeni dispergirovanija (*Determination of the modulus of elasticity of two-component heterogeneous mixture according to the degree of dispersion*). Mehanika kompozitnyh materialov.1981. N 5, p.37-43.

4. *Potapov A.I.* Primenenie impul'snyh nizkochastotnyh UZ metodov dlja kontrolja kachestva izdelij iz krupnostrukturnyh materialov (*The use of pulsed low-frequency ultrasonic methods for quality control of products from coarse-grained materials).* Defektoskopija. 1979. N 7, p.46-50.

5. *Potapov A.I.* Prognozirovanie opasnogo povrezhdenija v obrazcah i tonkostennyh jelementah konstrukcii pri ciklicheskom nagruzhenii (*Prediction of critical damage to the samples and thin-walled structural elements under cyclic loading*). Defektoskopija. 1990. N 10, p.37-43.

6. *Potapov A.I.* Prohozhdenie ul'trazvukovogo impul'sa cherez sloj s zatuhaniem pri beskontaktnom tenevom kontrole (*Transmission of an ultrasonic pulse through the attenuation layer during non-contact shadow control*). Defektoskopija. 1990. N 10, p.47-52.

7. *Potapov A.I.*, *Nosov V.V.* O vybore podhoda k razrabotke metodov NK prochnosti izdelij na osnove ispol'zovanija javlenija akusticheskoj jemissii (*On the choice of approaches to the development of methods of NDT strength of products through the use of acoustic emission phenomenon*). Defektoskopija. 1996. N 6, p.57-62.

8. *Potapov A.I.*, *Nosov V.V.* Strukturno-imitacionnaja model' parametrov akusticheskoj jemissii (*Structural-simulation model of acoustic emission*). Defektoskopija. 1996. N 6, p.39-44.

9. *Potapov A.I.*, *Nosov V.V.* Ocenka prochnosti korpusnyh izdelij pri ih gidroispytanijah po rezul'tatam registracii signalov akusticheskoj jemissii (S*trength assessment of body products during their hydraulic testing based on the results of acoustic emission signals registration*). Defektoskopija. 1998. N 5, p.99-107.

10. *Potapov A.I.*, *Pavlov I.V.* Akustojemissionnyj kontrol' nesushhej sposobnosti merzlyh osnovanij sooruzhenij i principy postroenija avtomatizirovannyh diagnosticheskih sistem (*Acoustic emission control of the bearing capacity of frozen foundations of structures and principles of automated diagnostic systems*). Defektoskopija. 1993. N 3, p.41-46.

11. *Potapov A.I.*, *Savitckii G.M.* Prochnost' i deformativnost' stekloplastikov (kontrol' v konstrukcii) (*Durability and deformability of GRP* (*control in the construction*). Leningrad: Strojizdat, 1973, p.144.

12. *Potapov A.I.*, *Petrov V.A.*, *Nosov V.V.*, *Pavlov I.V.* Principy podbora akustojemissionnyh pokazatelej prochnosti konstrukcionnyh materialov (*Principles of selecting acoustic emission indices of the strength of structural materials*). Defektoskopija. 1995. N 5, p.51-59.

13. *Sborovskii A.K.*, *Potapov A.I.*, *Poljakov V.E.*, Ul'trazvukovoj kontrol' kachestva konstrukcij (*The ultrasonic quality control of constructions*). Leningrad: Sudostroenie, 1978, p.200.

14. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Choosing an approach for developing methods for nondestructive testing of the strength of articles based on the acoustic emission phenomenon (*Choosing an approach for developing methods for nondestructive testing of the strength of articles based on the acoustic emission phenomenon*). Russian Journal of Non-destructive Testing. 1996. Vol.32, N 6, p.459-463.

15. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Structural simulation model for acoustic emission parameters (*Structural simulation model for acoustic emission parameters*). Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Vol.32. N 6, p.451-458.

NONDESTRUCTIVE CONTROL OF ELASTICITY MODULUS ANISOTROPY OF COMPOSITE MATERIALS IN THE PRODUCTS

A.I.POTAPOV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *apot@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

The technique of nondestructive control of anisotropy of composite materials in a product using a pulse ultrasonic method is considered in the article. Calculated dependence to determine the degree of filler orientation in a polymeric composite material with varying filler laying is shown. The following filler laying is considered: chaotic, longitudinally cross, unidirectional. In addition, experimental results of anisotropy control of the elastic modulus in glass-reinforced plastics with different degrees of anisotropy using the pulsed ultrasonic method are given in the article.

***Key words*:** nondestructive control, pulse ultrasonic method, elasticity modulus, composite materials, anisotropy, filler orientation.