

Характеристики упругости слоистых тканых стеклопластиков

Н. К. Кучер^а, А. З. Двейрин^б, М. П. Земцов^а, О. К. Анкянец^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б АНТК им. О. К. Антонова, Киев, Украина

Исследуются закономерности упругого деформирования слоистых стеклопластиков, армированных тканью сатинового переплетения. Анализируются различные экспериментальные методы определения характеристик упругости слоистых материалов. Рассматривается влияние охлаждения материала до 77 К на его механическое поведение.

Ключевые слова: композиционные материалы, армирующие ткани, стеклопластик, волокно, нити, матрица, характеристики упругости.

Обозначения

XYZ	– система декартовых координат слоистого пакета, совпадающая с осями его упругой симметрии
E_x, E_y, E_z и G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	– соответственно модули упругости и модули сдвига ортотропного тела
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \dots, \nu_{yz}$	– коэффициенты Пуассона ортотропного тела
A_{ij}	– параметры упругости ортотропного тела
a, b, h	– соответственно длина, ширина и высота пластины
w	– относительный прогиб пластины
I	– осевой момент инерции поперечного сечения стержня
P	– сосредоточенная нагрузка

Введение. Композиционные материалы, армированные волокнистыми текстильными каркасами, широко применяются в различных отраслях народного хозяйства. Основные преимущества указанных материалов перед металлами – высокая удельная прочность на единицу массы, значительная эластичность, существенное сопротивление развитию повреждений, антикоррозионная стойкость и уникальные теплофизические свойства. Тканые материалы, являющиеся в основном двухмерными структурами, имеют стабильные механические свойства в ортогональных направлениях основы и утка. Кроме того, они характеризуются более высокими драпирующими свойствами, чем однонаправленные композиты. Благодаря возможности управления механическими свойствами и низкой стоимости изготовления тканые материалы все более широко используются для изготовления несущих и вспомогательных элементов конструкций в самолето-, судо- и ракетостроении, в строительстве, на транспорте и т.д.

Несмотря на то что способы получения текстильных материалов известны давно, технологии изготовления композиций на их основе развиваются

крайне медленно. Конструирование и изготовление деталей из тканых пластиков в большинстве случаев проводятся эмпирически. В частности, это объясняется недостаточным знанием деформационных и прочностных свойств существующих тканевых пластиков, отсутствием надежных методов их расчета.

Цель настоящей работы заключается в изучении закономерностей упругого деформирования армированных тканями слоистых стеклопластиков, анализе различных экспериментальных методик определения характеристик упругости слоистых композиций и исследовании влияния охлаждения материала до 77 К на его механическое поведение.

Основным структурным элементом тканых композитов является элементарный слой, состоящий из текстильного материала и матрицы. Слоистые двухмерные композиции получают в результате последовательной укладки друг на друга слоев в определенном направлении.

Объектом исследования служил стеклопластик, армированный тканью сатиновой структуры. Схема укладки слоев $0/90^\circ$. Слои сбалансированы относительно срединной поверхности. Их общее количество составляет 19.

Методика и результаты эксперимента. Для анализа механического поведения тканого стеклопластика воспользуемся макромеханическим подходом, когда исследуемый композит заменяется “эквивалентной” однородной анизотропной средой [1, 2]. Согласно методу энергетического сглаживания Болотина, такая замена вполне допустима, так как тканые композиции обладают регулярным строением и содержат большое количество структурных элементов, которые в большинстве случаев не рационально рассматривать отдельно.

Тканые композиции со схемой укладки слоев $0/90^\circ$ относятся к классу ортотропных материалов. При комнатной температуре в диапазоне малых деформаций их деформирование достаточно хорошо описывается соотношениями линейной теории упругости ортотропного тела [3–5].

Для изучения механического поведения слоистых композиций будем использовать систему декартовых координат XYZ . При этом предполагается, что плоскость XOY совпадает со срединной поверхностью стеклопластика, оси X , Y , Z являются осями упругой симметрии.

Деформационные свойства упругого ортотропного тела [6] характеризуются 12 параметрами упругости, из которых независимы – девять: три модуля упругости E_x , E_y , E_z ; три модуля сдвига G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} и три коэффициента Пуассона ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} . Остальные три упругие постоянные (коэффициенты Пуассона) вычисляются из зависимостей

$$E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy}; \quad E_x \nu_{zx} = E_z \nu_{xz}; \quad E_y \nu_{zy} = E_z \nu_{yz}, \quad (1)$$

где $\nu_{xy} = -\varepsilon_y / \varepsilon_x$ при действии силы в направлении x .

Для определения постоянных параметров упругости стеклопластика проводились испытания на растяжение, сжатие, трехточечный и антиплоский изгиб. При испытаниях материала на одноосное растяжение или сжатие использовались призматические образцы, вырезанные из слоистых пластин в направлениях главных осей упругой симметрии. Нагружение

осуществлялось на испытательной машине “Instron-1126” с помощью клиновидных захватов. С целью предотвращения разрушения образцов в местах их крепления устанавливались специальные накладки. Размеры рабочей части образцов соответствовали ГОСТ 35601-80 и ГОСТ 25602-80. При испытаниях на сжатие применялось специальное приспособление, которое исключало потерю устойчивости образца, но не ограничивало его осевую деформацию.

Результаты деформирования образцов при растяжении и сжатии свидетельствуют, что упругие характеристики стеклопластика практически не изменяются при знакопеременном нагружении. Для более точного определения параметров материала с учетом возможного разброса экспериментальных данных измерения проводились при пяти значениях фиксированной нагрузки для пяти образцов как при растяжении, так и при сжатии. Полученные величины затем усреднялись. При определении характеристик упругости образцы деформировались до значений нагрузки, не превышающей 30% разрушающей. Результаты испытаний представлены ниже: $E_x = 26600$ МПа; $E_y = 23300$ МПа; $E_z = 5400$ МПа; $G_{xy} = 5030$ МПа; $G_{xz} = 1140$ МПа; $G_{yz} = 950$ МПа; $\nu_{xy} = 0,17$; $\nu_{xz} = 0,52$; $\nu_{yz} = 0,53$; $\nu_{yx} = 0,15$; $\nu_{zx} = 0,11$; $\nu_{zy} = 0,12$. Модуль сдвига композиции в плоскости армирования вычислялся при использовании результатов испытаний образцов, вырезанных под углом 45° к направлению главных осей упругой симметрии. Тогда согласно данным [4, 7] имеем

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \left[\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \right]. \quad (2)$$

Значение модуля продольной упругости в направлении 45° оказалось достаточно низким (15000 МПа). В результате вычислений значение $G_{xy} = 5030$ МПа.

Для уточнения вычислительного модуля сдвига были проведены испытания на антиплоский изгиб квадратных в плане пластин [1, 2]. Пластина устанавливалась на двух опорах, расположенных по углам одной из диагоналей, а на двух других нагружалась сосредоточенной силой P (рисунок).

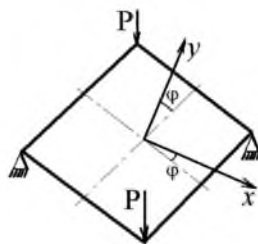


Схема нагружения пластины при антиплоском изгибе.

Под действием равномерно распределенных изгибающих и крутящих моментов пластина принимает форму поверхности второго порядка. Если сторона исследуемого квадрата образует угол φ с направлением главных

осей, то соотношение между силой P , относительным прогибом w и параметрами упругости A_{ij} примет вид [1]

$$wh^3 = 3P \sin(2\varphi)[(A_{11} - A_{12})x^2 + (A_{12} - A_{22})y^2] + 3P \cos(2\varphi)A_{66}xy, \quad (3)$$

где h – толщина пластины; $w = w(x, y)$ – прогиб точки с координатами x, y относительно центра пластины.

Выбирая угол φ равным нулю и координаты точки $M(x_1, y_1)$, для которой экспериментально определяем w , по формуле (3) находим $A_{66} = 1/G_{xy}$. Достоверность методики проверялась при определении двух соотношений между A_{11} , A_{12} и A_{22} из аналогичных экспериментов для значений $\varphi = 0$ и 90° . Если использовать значение коэффициента Пуассона, вычисленное по результатам испытаний на растяжение, то можно определить следующие параметры упругости: $E_x^{a.и} = 26410$ МПа; $E_y^{a.и} = 21140$ МПа; $G_{xy}^{a.и} = 5650$ МПа. Здесь и далее верхний индекс указывает на испытания, результаты которых использовались при вычислении данной величины (а.и – антиплоский изгиб). Как видно, полученные значения параметров упругости хорошо коррелируют с результатами испытаний на растяжение. Аналогичные образцы для определения остальных параметров упругости не удалось изготовить ввиду малости толщины листа ($h = 4,5$ мм) исследуемого стеклопластика.

Характеристики межслойного сдвига G_{xz} , G_{yz} вычислялись по данным испытаний на трехточечный изгиб прямых стержней с прямоугольным поперечным сечением. Стержни вырезались из пластины в направлениях OX и OY . Свойства материала прогнозировались на основании измеренных величин нагрузки и прогиба с помощью формул, точность которых определяется гипотезами, лежащими в основе модели Тимошенко [8]. В частности, предполагается, что материал является изотропным однородным и имеет одинаковые модули упругости при растяжении и сжатии, а величина прогиба – мала. Тогда для свободно опертого на двух опорах стержня, нагруженного сосредоточенной нагрузкой P в середине пролета l , при максимальном прогибе w_{\max} можем записать [1, 3]

$$\frac{48Iw_{\max}}{Pl^3} = \frac{1}{E_x^и} + \frac{1,2}{G_{xz}^и} \left(\frac{h}{l}\right)^2, \quad (4)$$

где I – осевой момент инерции поперечного сечения стержня; h – его высота; 1,2 – коэффициент, зависящий от формы сечения стержня.

С помощью данных единичного эксперимента по формуле (4) нельзя вычислить модули упругости $E_x^и$, $G_{xz}^и$, поскольку она содержит две неизвестные величины. Поэтому необходимо провести испытания нескольких образцов с разными соотношениями h/l и построить график, по оси абсцисс которого откладывается величина $(h/l)^2$, по оси аппликат – $48Iw_{\max}/(Pl^3)$. В этих координатах зависимость (4) должна определять прямую линию,

тангенс наклона которой к оси абсцисс равен $1,2/G_{xz}^H$. Более точные результаты при построении такой линии можно получить с использованием метода наименьших квадратов [2, 9]. Аналогичные опыты проводились для образцов, вырезанных из пластины в направлении OY . При вычислениях E_y^H, G_{yz}^H использовали соотношение (4), заменив в нем E_x^H, G_{xz}^H величинами E_y^H, G_{yz}^H , в результате чего $E_x^H = 24100$ МПа, $E_y^H = 21900$ МПа. Определенные значения модулей сдвига представлены выше.

Для определения значения E_z проводились испытания на сжатие. С этой целью разрабатывалась специальная методика испытания малых образцов в виде параллелепипеда ($10 \times 10 \times 4,5$ мм), учитывающая жесткость испытательной машины и небольшую длину базы измерений.

Деформация призматического образца в поперечном направлении при действии сжимающей нагрузки оценивалась по методике, основанной на сравнении угла наклона линейной диаграммы нагрузка – перемещение с аналогичной диаграммой материала с известным модулем упругости. Угол наклона такой диаграммы характеризует как жесткость образца, так и жесткость нагружающей системы. По диаграммам, полученным для двух геометрически одинаковых образцов в идентичных условиях, можно определить деформации, возникающие непосредственно в образцах, путем вычитания деформаций нагружающей системы.

Для данного слоистого стеклопластика наблюдается существенная разница между характеристиками упругости в направлении главных осей, проявляющаяся в слабом сопротивлении межслойному сдвигу ($E_x/G_{xz} = 23,5$) и поперечному отрыву ($E_y/E_z = 4,1$).

Использование испытаний на антиплоский или трехточечный изгиб при определении характеристик упругости может привести к результатам, которые отличаются от E_x, E_y, G_{xy} , вычисленных на основании данных испытаний на растяжение, на 1...11%, что вполне приемлемо для такого класса материалов. Однако при испытаниях на трехточечный изгиб следует учитывать, что доля прогибов от поперечных сдвигов составляет лишь часть от общего прогиба образца. Поэтому относительный прогиб l/h необходимо выбирать в зависимости от степени анизотропии материала E_x/G_{xz} таким, чтобы влияние сдвигов было пренебрежимо малым. При этом минимальное допустимое отношение l/h должно быть по крайней мере больше восьми. Зависимость необходимого относительного прогиба от степени анизотропии материала при определении модулей упругости с заданной погрешностью приведена в работе [2].

Для оценки влияния охлаждения на упругое деформирование тканого стеклопластика проводились аналогичные испытания при температуре 77 К. Исследуемые образцы помещались в криостат, в который заливался жидкий азот. В частности, при испытаниях на трехточечный изгиб балки при комнатной температуре изгиб измерялся с помощью тензометра. Измерение прогиба в среде жидкого азота вызывает определенные трудности. Поэтому при его вычислении использовались диаграммы нагрузка – время и стрела прогиба – время, полученные как при комнатной температуре, так и при 77 К.

Поскольку скорость перемещения траверсы испытательной машины была постоянной, диаграмма стрела прогиба – время представлялась в виде линейной функции. Скорость развертки диаграмм во времени и геометрические параметры системы нагружения оставались такими же, как и при комнатной температуре. Постоянные параметры нагружения и регистрирующей системы гарантируют точное определение величины прогиба при температуре жидкого азота на диаграмме нагрузка – время.

Выполненные исследования показали, что понижение температуры образца до 77 К приводит к заметному изменению модулей продольной упругости ($E_x^{77} = 31600$ МПа, $E_y^{77} = 27700$ МПа) и значительному увеличению модуля сдвига в плоскости армирования ($G_{xy}^{77} = 10490$ МПа).

Выводы

1. Наиболее достоверные характеристики жесткости слоистых композиций, армированных тканью, можно получить по результатам испытаний на растяжение или сжатие образцов, вырезанных из пластин под углами 0, 45 и 90° к направлению главных осей. Вычисление таких параметров, как E_x , E_y , G_{xy} , по данным испытаний на трехточечный изгиб приводит к погрешностям, связанным с размерами образцов и исходными предпосылками расчетной модели.

2. Для определения сопротивления композиции межслойному сдвигу и поперечному отрыву использовались результаты испытаний на трехточечный изгиб. Погрешность при вычислении G_{xz} , G_{yz} , ν_{zx} , ν_{zy} не превышает 12%, что является вполне приемлемым для данного класса материалов.

3. Исследуемый материал может использоваться в широком интервале низких температур, если нет ограничений на параметры жесткости. Понижение температуры эксплуатации эпоксидного стеклопластика до 77 К приводит к увеличению модуля сдвига в плоскости армирования почти на 100%. Модули продольной упругости изменяются в меньшей степени (15...20%). Прочностные свойства материала при этом уменьшаются на 10...25%.

Резюме

Досліджуються закономірності пружного деформування шаруватих склопластиків, що армовані тканиною сатинового переплетення. Аналізуються різні експериментальні методики визначення характеристик пружності шаруватих матеріалів. Розглядається вплив охолодження матеріалу до температури 77 К на його механічну поведінку.

1. Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
2. Васильев В. В., Протасов В. Д., Болотин В. В. и др. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

3. Вишняков Л. Р., Грудина Т. В., Кадыров В. Х. и др. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
4. Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу, Ф. Ко. – М.: Мир, 1991. – 430 с.
5. Тарнопольский Ю. М., Скудра А. Н. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.
6. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
7. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с яп. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
8. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 364 с.
9. Кучер Н. К., Земцов М. П. Деформирование и прочность слоистых углепластиков при температурах 293 и 77 К // Пробл. прочности. – 2001. – № 3. – С. 46 – 56.

Поступила 09. 04. 2003