

УДК 620.17

DOI 10.33113/mkmk.ras.2020.26.03.313_326.02

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ СДВИГА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Жигун В.И.¹, Плуме Э.З.¹, Муйжниекс К.И.¹, Краснов Л.Л.²¹*Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия*²*Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Отмечены некоторые из причин, ограничивающие использование композиционных материалов в деталях конструкционного назначения, среди которых можно выделить их относительно низкую жёсткость при межслойном сдвиге и отсутствие достоверных методов её установления. Представлен анализ используемых методов оценки модуля межслойного сдвига композиционных материалов. Показано, что они, в основном, базируются на опытах испытания образцов на поперечный изгиб с измерением прогиба под точкой приложения нагрузки. Методы достаточно трудозатратны, неудобны в практическом использовании, и не позволяют получать стабильные и достоверные значения определяемой характеристики композиционных материалов. Модификация некоторых из них за счёт учёта отдельных факторов, влияющих на прогиб образца, как, например, закруглений опор, существенно осложняет процесс оценки модуля межслойного сдвига. При этом достоверность определяемых значений не доказана. Предложено три метода, позволяющие определять модули сдвига в трёх главных плоскостях упругой симметрии ортотропных композитов. Для двух из них разработаны необходимые устройства, обеспечивающие простоту их реализации и подход к тензодатчикам, наклеенным на образец. Рассмотрен характер распределения касательных напряжений в образце вблизи точек приложения к нему сосредоточенных сил. На основе данного фактора установлены оптимальные параметры образцов и схем их нагружения. Приемлемость каждого метода оценена путём сравнения определяемого значения характеристики с её значением, полученным при помощи другого, достоверного, метода. Проверка осуществлялась на различных типах композиционных материалов. Установлено, что один из предложенных методов позволяет определять также и модуль межслойного сдвига композитов. Показано, что значения модуля межслойного сдвига для ортогонально-армированных композиционных материалов имеют существенно более низкие значения, чем значения модуля сдвига в плоскости пластины. Отмечены достоинства рассмотренных методов: их универсальность, удобство и простота реализации, а также стабильность и воспроизводимость получаемых значений.

Ключевые слова: композиционные материалы; модули сдвига; модуль межслойного сдвига; поперечный изгиб; сдвиг

UNIVERSAL METHODS FOR DETERMINING THE SHEAR MODULES OF COMPOSITE MATERIALS

Zhigun V.I.¹, Plume E.Z.¹, Muiznieks K.I.¹, Krasnov L.L.²¹*Institute of Material Mechanics, University of Latvia, Riga, Latvia*²*All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Some of the reasons limiting the use of composite materials in structural parts have been noted. Among them we can distinguish their relatively low stiffness during interlayer shear and the lack of reliable methods for its establishment. The analysis of the methods used for estimating the modulus of interlayer shear of composite materials has been presented. It has been shown that they are mainly based on the experiments of testing samples for transverse bending with the measurement of deflection under the point of application of the load. The methods are quite labor-consuming, inconvenient in practical use, and do not allow to obtain stable and reliable values of the determined characteristics of composite materials. Modification of some of them by taking into account certain factors affecting the deflection of the sample, such as the curvature of the supports, significantly complicates the process of estimating the interlayer shear modulus. However, the reliability of the determined values is not proven. Three methods have been proposed for determining the shear modulus in the three main planes of elastic symmetry of orthotropic composites. For two of them the necessary devices to ensure the simplicity of their implementation and the approach to the strain gauges glued to the sample have been developed. The nature of the distribution of tangential stresses in the sample near the points of application of concentrated forces to it has been considered. Based on this factor, the optimal parameters of samples and their loading schemes have been established. The acceptability of each method has been evaluated by comparing the determined value of the characteristic with its value obtained using another, reliable method. The test has been performed on various types of composite materials. It has been established that one of the proposed methods also allows determining also the interlayer shear modulus of composites. It has been shown that the values of the interlayer shear modulus for orthogonally reinforced composite materials have significantly lower values than the values of the shear modulus in the plate plane. The advantages of the considered methods have been noted: their universality, convenience and ease of implementation, as well as stability and reproducibility of the obtained values.

Keywords: composite materials; shear modulus; interlayer shear modulus; lateral bending; shear

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение слоистых композиционных материалов (КМ) в различного вида несущие конструкции приводит к необходимости определения их межслойных характеристик – модуля межслойного сдвига и прочности при межслойном сдвиге. Обусловлено это тем, что данные характеристики являются самым слабым звеном слоистых КМ. Свойства последних, при некоторых видах нагружения, ограничиваются свойствами полимерной матрицы, которая подвержена существенному влиянию температуры, а также многими другими факторами [1]. Поэтому, несмотря на то, что отмеченные характеристики непосредственно не используются в большинстве расчётов, определяющих несущую способность изделий, учёт их значений при этом весьма важен.

Однако, удобных и надёжных методов установления значений отмеченных характеристик, в особенности – модуля межслойного сдвига, пока не создано.

Существующие оценки [2-4] базируются на опытах испытаний на поперечный изгиб призматических стержней с различным отношением пролёта к толщине образца с замером прогибов под точками приложения нагрузок. Получаемые в результате значения модуля межслойного сдвига имеют большой разброс и зависят от многих факторов [5,6], а сам процесс испытаний является довольно громоздким.

Опубликован ряд работ [7-11], в которых изложены другие методы определения модуля межслойного сдвига, но они также относительно громоздки и неудобны для практического использования.

Так, в [7] предложен метод определения модуля межслойного сдвига из опытов на изгиб одновременно двух одинаковых образцов, нагруженных по трёх и четырёхточечной схемам. Первый образец опирается по концам на две основные опоры, на него установлены две промежуточные опоры на одинаковом расстоянии от основных опор, на которые устанавливается второй образец. Ко второму образцу в его середине приложена сосредоточенная сила. Устанавливается заранее рассчитанное расстояние между основными и промежуточными опорами, и в процессе нагружения измеряются максимальные прогибы образцов. По значениям нагрузки и прогибов определяется значение искомой характеристики. Процесс весьма громоздок, а достоверность получаемого значения модуля межслойного сдвига в работе не подтверждена.

В работе [8] приведён численный анализ напряжённно-деформированного состояния образцов из КМ при трёхточечной схеме их нагружения на изгиб и межслойный сдвиг методом короткой балки. Выявлена существенная зависимость экспериментально определяемых упругих характеристик от задаваемых значений модулей межслойного сдвига, толщины монослоя, исходной толщины препрега, имеющей при изготовлении довольно большой допуск, и отношения длины пролёта к толщине образца. Утверждается, что учёт этих факторов позволяет в значительной мере компенсировать недостатки, присущие рассмотренным методам.

Несколько иной метод определения модуля межслойного сдвига слоистого углепластика предложен в [9]. Он основан на вычислении искомой характеристики, исходя из разницы между модулем упругости при растяжении образца и эффективным модулем упругости образца при поперечном изгибе. Для расчёта, кроме отмеченных двух модулей упругости, необходимы также данные о замере глубины вдавливания в образец опор с двумя различными радиусами закруглений, а также модуль упругости и коэффициент Пуассона используемого связующего. Данный метод является достаточно трудозатратным, а сведения о достоверности полученных при этом значений отсутствуют.

На измерении прогиба под точкой приложения силы при трёхточечном изгибе основан и метод определения модуля межслойного сдвига слоистого пластика [10]. Отличие его от других рассмотренных методов состоит лишь в том, что он позволяет непосредственно определять модуль межслойного сдвига G_{13} , исходя из данных испытаний двух образцов с различным отношением пролёта к их толщине. При этом прогиб с учётом межслойного сдвига рассчитывается по известным формулам с учётом коэффициента межслойного сдвига для прямоугольного образца. То есть, никаких существенных положительных отличий он не содержит. Использование подобных методов для определения модуля межслойного сдвига слоистого стекла не привело к достижению поставленной цели, что показано в работе [11], авторы которой пришли к заключению, что испытание одного и того же материала различными методами не приводит к одним и тем же результатам. В работе [12] данный метод отмечен как неприемлемый для оценки жёсткости КМ.

Рассмотренные варианты, как следует из приведённого анализа, ограничены лишь поиском различных факторов, влияющих на прогиб при поперечном изгибе, и их учёте при вычислении модуля межслойного сдвига. Использование этих

подходов для установления точного значения модуля межслойного сдвига пока не представляется возможным по причине сложности учёта всех факторов, влияющих на его значение. В то время как некоторые из уже предложенных методов определения модуля сдвига в плоскости пластины позволяют устанавливать его значения и в двух других плоскостях ортотропного КМ. Расширение поиска подобных методов определения модулей сдвига представляется наиболее перспективным подходом к совершенствованию уже существующих и разработке новых методов определения межслойного модуля сдвига. Это позволит не только установить значения последнего, но и показать их достоверность. Исходя из вышеизложенного, разработка такого подхода является целью настоящей работы.

1. ПЕРВЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД И ЕГО МОДИФИКАЦИЯ

В работе [13] описаны довольно простые методы определения модуля сдвига в плоскости пластины, один из которых является универсальным. Это метод испытаний призматических образцов на четырёхточечный изгиб, позволяющий определять модули сдвига ортотропных композиционных материалов в трёх ортогональных плоскостях (рис.1). Его реализация не вызывает особых трудностей при наличии испытательной машины и необходимых приспособлений, обеспечивающих нагружение образца в точном соответствии с заданной схемой нагружения, а также простоту и удобство проведения испытаний. Однако на выполнение этих условий оказывают существенное влияние способ крепления верхней траверсы к захвату машины и размер параметра « b » (рабочей зоны образца). Наличие жёсткого крепления и относительно малая рабочая зона образца не позволяют передавать усилия в точках их приложения обратно пропорционально соответствующим участкам траверс. В этом случае в точках 1 и 2 (см. рис.1) имеет место заметное отличие величин передаваемых усилий от расчётных, что влияет на стабильность и достоверность значений определяемой характеристики.

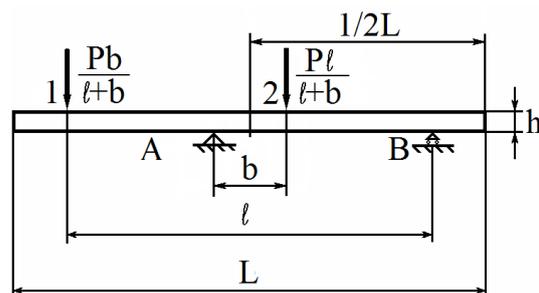


Рис.1. Схема нагружения образца при испытании на четырёхточечный изгиб [13].

Предложенное нами устройство, позволяющее передавать нагрузку от испытательной машины через шарнир на верхнюю траверсу, обеспечивает свободное расположение её опор на образце, что, наряду с созданием равных пролётов между точками приложения усилий, исключает отмеченный недостаток. При этом значительно увеличивается рабочая зона образца, что существенно облегчает процесс проведения эксперимента. Схема нагружения образца, а также эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов для такого случая нагружения приведены на рис.2.

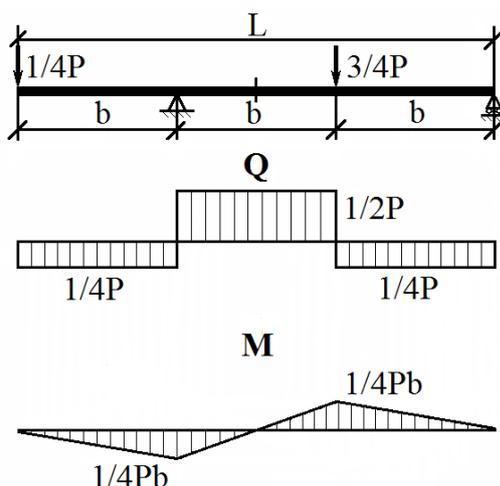


Рис.2. Схема нагружения и эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов при испытании образца на четырёхточечный изгиб с равными пролётами.

В этом случае в данных точках лучше обеспечивается выполнение необходимого соотношения

$$l_1 P_2 = l_2 P_1,$$

где индексы 1, 2 соответствуют точкам приложения усилий (см.рис.1), l – расстояние от центра нагружения до точки приложения усилия. Зависимость относительных деформаций обоих тензодатчиков в направлениях $\pm 45^\circ$ от нагрузки также практически одинакова. При этом продольные относительные деформации по центру образца имеют весьма незначительные значения. Так, например, для УП-2 относительные деформации под углами $\pm 45^\circ$ при нагрузке, равной 3 кН, составляли 0,0291% и 0,0295%. Продольная относительная деформация по центру образца при этом составляла 0,0026%. В то же время, при разных пролётах ($b < 1/2h$), как следует из [13,14], относительные деформации существенно различаются. Одной из причин этого, по-видимому, является характер распределения касательных напряжений τ_{xz} по сечениям и высоте образца вблизи точек приложения сосредоточенных сил (рис.3).

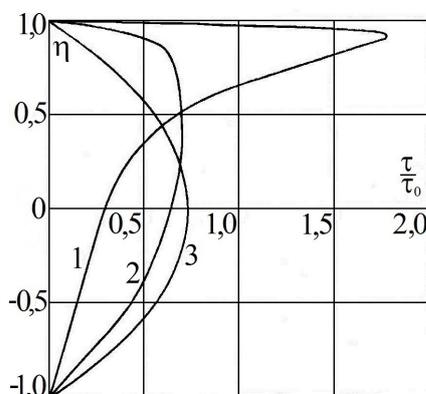


Рис.3. Эпюры относительных значений касательных напряжений по сечению балки: $\xi = 0,03$ (1); $\xi = 0,10$ (2); $\xi = 0,50$ (3); $\frac{L}{H} = 5$; $c = \frac{l}{L} = 1$; $\alpha^2 = 30$; $\beta^2 = 150$.

Данный рисунок, а также сопутствующие ему данные, без изменений взяты из работы [15], в которой исследуется контактная задача для балок из КМ на примере изгиба по трёхточечной схеме нагружения. То есть, рассмотрена балка, лежащая на двух опорах и нагруженная в середине пролёта силой P . В [15] принято

$$\xi = \frac{x}{0,5L}; \quad \eta = \frac{z}{0,5H}.$$

Здесь ξ , η – относительные параметры; для центрального сечения балки $\eta = 0$; $\xi = 0$.

$$\alpha^2 = \frac{E_x}{E_z}; \quad \beta^2 = \frac{E_x}{G_{xz}} - 2\nu_{zx}.$$

Здесь E_x , E_z , G_{xz} , ν_{zx} – соответственно, модули упругости материала в направлениях x , z ; модуль сдвига и коэффициент Пуассона, характеризующий деформацию сжатия в направлении z при растяжении в направлении x ; через L и H обозначены, соответственно, длина и высота образца.

Известно [16], что закон касательных напряжений не зависит от осевой координаты ξ , и по высоте сечения описывается формулой Журавского.

Отклонение от этого закона для образца с отношением $\frac{L}{H} = 5$ и параметрами

анизотропии материала $\alpha^2 = 30$ и $\beta^2 = 150$, можно наблюдать на рис.3, откуда видно, что распределение касательных напряжений τ_{xz} по высоте образца не одинаково для всех значений ξ . В сечениях, близких к центральному, пик напряжений смещается в сторону приложения сосредоточенной силы, к верхней поверхности образца. Слои, близкие к нижней поверхности образца при этом оказываются без заметных напряжений. Увеличение значения ξ способствует сглаживанию пика τ_{xz} , и лишь при $\xi = 0,50$ кривая напряжений по высоте сечения приближается по форме к параболе, описываемой формулой Журавского. То есть, максимальное касательное напряжение находится на уровне нейтрального слоя и, согласно этой формуле, не зависит от осевой координаты. Аналогичная картина распределения τ_{xz} по сечению образца приведена в [17].

Для стержня из ортотропного материала, лежащего на двух опорах с относительным пролётом $L/H = 4$, нагруженного силой P в середине пролёта, рассчитаны напряжения в 4 вертикальных сечениях. Сечения расположены на расстояниях $1/4H$, $1/2H$, $3/4H$ и H от центра приложения силы P . Показано, что пик τ_{xz} соответствует нейтральной линии образца в сечении, расположенном на расстоянии H от центра приложения силы P . Таким образом, учитывая характер распределения касательных напряжений в местах приложения сосредоточенных сил и процесс реализации метода четырёхточечного изгиба, наиболее приемлемыми значениями параметров являются $b = 45$ мм, $L = 135$ мм. Увеличение длины пролётов между точками приложения усилий позволяет также существенно снизить наклон кривой изгибающего момента в расчётном сечении, что, по-видимому, должно оказывать положительное влияние на точность значений определяемой характеристики. При таких значениях параметров обеспечивается хороший доступ к датчикам, наклеенным на образец, и облегчается соединение их с регистрирующей аппаратурой, что заметно

сокращает время подготовки и проведения испытаний. Модуль сдвига при этом определяется как

$$G_{xy} = \frac{0.5P}{F(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad (1)$$

где P – сила приложенная к образцу; F – площадь поперечного сечения образца; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительные деформации. Достоверность и стабильность значений определяемой характеристики при этом обеспечивается на хорошем уровне. Об этом свидетельствуют данные таблицы 1, в которой приведено сопоставление значений модуля сдвига, полученных при помощи данного метода со значениями, полученными посредством использования метода кручения квадратных пластинок по трёхточечной схеме нагружения.

Таблица 1.

Значения модулей сдвига КМ (ГПа), определённых из опытов на кручение квадратных пластинок и на четырёхточечный изгиб призматических образцов.

Метод определения	Тип материала и его толщина, мм				
	УП1:1 2,2		УП1-4 4,4	УП2-4 4,4	СПП1:1 3,8
	G_{xy}	G_{45}	G_{xy}	G_{xy}	G_{xz}
Кручение пластинок	3,49	26,65	29,45	18,07	3,42
	3,50	26,61	29,43	18,00	3,42
Четырёхточечный изгиб	3,45	26,49	29,17	17,90	3,44
	3,43-3,51	26,53	29,59	17,82	3,46

Примечание:

УП – углепластик; в числителе дроби содержится среднее значение характеристики,

в знаменателе – её минимальное и максимальное значение;

СПП – стеклопластик пространственно-армированной структуры, модуль сдвига которого определялся в плоскости xz .

Метод кручения пластинок, как показано в работе [13], позволяет получать достоверные и надёжные значения модуля сдвига в плоскости пластины. В обоих методах испытаний использовались образцы, вырезанные из одной и той же пластины для каждого типа КМ. Для испытания на кручение из каждого типа исследуемого материала вырезалось по две пластинки. При испытании вторым методом, вначале, для материала УП1:1, использовались четыре образца, вырезанные из пластины в направлениях x и y , по два образца в каждом направлении. Вырезка образцов в двух направлениях осуществлялась с целью оценки как качества изготовления КМ, так и метода определения модуля сдвига. Принимая во внимание несущественность разброса и стабильность определяемых значений G_{xy} для УП1:1, в целях экономии материалов, дальнейшие испытания на четырёхточечный изгиб остальных типов КМ проводились лишь на двух образцах, вырезанных по одному в направлениях x и y . Методика проведения испытаний изложена в работе [13]. Образцы с наклеенными на них тензодатчиками, испытанные методом четырёхточечного изгиба, представлены на рис.4.

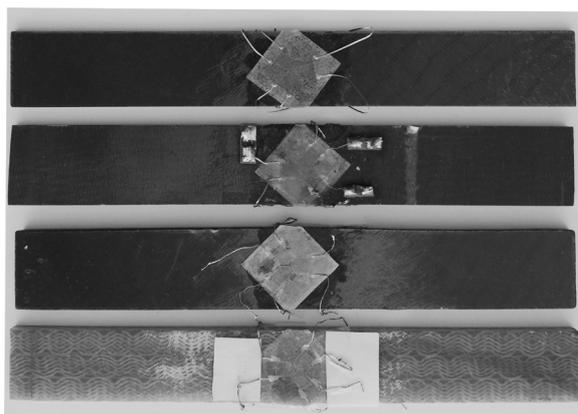


Рис.4. Образцы, испытанные методом четырёхточечного изгиба с одинаковыми пролётами.

Углепластик УП1:1 испытывался как в главных направлениях упругой симметрии образца (G_{xy}), так и под углом 45° к ним (G_{45}). Модуль межслойного сдвига G_{xz} пространственно-армированного стеклопластика оценивался непосредственно на образцах, вырезанных из плиты толщиной 45 мм в трансверсальном направлении. Хорошая согласованность значений модуля сдвига, определённых двумя различными методами, даёт основание использовать метод испытания на четырёхточечный изгиб призматических образцов с указанными параметрами « b » и « L » для установления модулей сдвига в трёх главных плоскостях упругой симметрии ортотропных КМ. Этот метод из-за простоты его реализации и универсальности использования является перспективным для широкого применения в практических целях, обеспечивая заданные значения усилий в точках их приложения к образцу.

2. ВТОРОЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД

Следует отметить, что обратносимметричное (бинарное) нагружение образца (рис.5) при сохранении простоты и универсальности, позволяет лучше обеспечить заданные значения усилий в точках их приложения к образцу. При этом принципиального отличия в эпюрах перерезывающих сил и изгибающих моментов с прежней схемой нагружения (см. рис.2) не наблюдается. Некоторые различия имеют место лишь в абсолютных значениях перерезывающих сил и изгибающих моментов, что находит отражение в формуле вычисления модуля сдвига

$$G_{xy} = \frac{P}{3F(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)},$$

где P – общая нагрузка, приложенная к образцу, согласно шкале испытательной машины, равная: $P = 2P_0$. Однако, эти различия не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на определяемые значения модулей сдвига.

Об этом свидетельствует сопоставление модулей сдвига, определённых на одних и тех же образцах двумя методами (табл.2). Вначале образец испытывался одним методом, затем – другим. Реализация последнего метода осуществлялась с помощью устройства, представленного на рис.6.

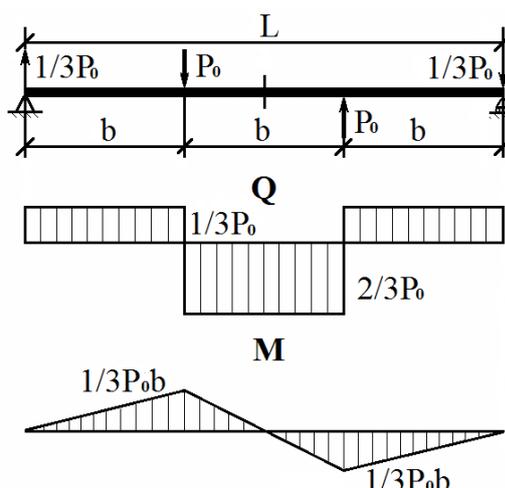


Рис.5. Схема нагружения и эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов при испытании образца с бинарным приложением усилий.

Таблица 2.

Значения модулей сдвига G_{xy} КМ (ГПа), определённых методами испытаний на четырёхточечный изгиб и изгиб по схеме рис.5 (бинарное нагружение).

Метод определения	Тип материала и его толщина, мм				
	СП 1:1 13,0	УП 1:1 1,9	УП 5 6,6	УП 2-4 4,4	УУК-2 10
Четырёхточечный изгиб	4,24	3,79	5,62	17,90	6,72
	4,05	3,87	5,50	17,82	6,84
Бинарное нагружение	4,12	3,99	5,54	18,30	6,80
	3,95	3,83	5,68	17,54	6,54

Примечание: СП – стеклопластик; УУК – углерод-углеродный композит.



Рис.6. Общий вид устройства для бинарного нагружения образца.

Всего испытано по два образца каждого выбранного КМ. Данные таблицы 2 показывают отличную согласованность значений модулей сдвига, полученных рассматриваемыми методами для всех исследованных типов КМ. Это подтверждает приемлемость использования предложенной схемы нагружения образца для определения значений модулей сдвига ортотропных КМ во всех трёх плоскостях их упругой симметрии.

3. ТРЕТИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД

Изложенные здесь, а также в работах [2,3,13], методы определения модулей сдвига КМ основаны на использовании касательных напряжений, возникающих в поперечных сечениях образца при изгибе. Их применение для определения модуля межслойного сдвига, на наш взгляд, пока не представляется возможным. В то время как необходимость получения достоверных данных о его значениях возрастает. Поэтому оценена возможность использования касательных напряжений, возникающих в продольных сечениях образцов при поперечном изгибе, для определения модуля сдвига КМ в плоскости $xу$ (G_{xy}), достоверность которого можно легко подтвердить. Это позволило установить иной подход к определению межслойного модуля сдвига. Для этого рассмотрен наиболее простой метод испытания призматических образцов на поперечный изгиб по трёхточечной схеме нагружения с приложением усилия в середине пролёта. При этом длина пролёта L принята с учётом характера распределения касательных напряжений [15,17] и высоты образца ($H = 10-20$ мм; $L = 60$ мм). Процесс исследования оставался прежним. На образец в установленных местах наклеивались тензодатчики под углами $\pm 45^\circ$, начиная от нейтральной линии – выше и ниже её, попарно с двух параллельных сторон, по одному датчику с каждой стороны как для основных поверхностей образца, так и для его торцевых сторон (рис.7).

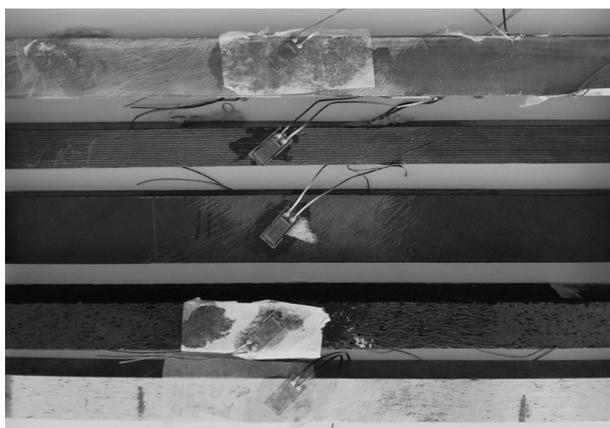


Рис.7. Образцы, испытанные методом трёхточечного изгиба

База тензодатчиков составляла 6мм. При возможности можно использовать розетку из трёх тензодатчиков $-0^\circ, \pm 45^\circ$. Сначала образец с двумя наклеенными тензодатчиками в плоскостях x, y испытывался на четырёхточечный изгиб при одинаковых расстояниях между точками приложения сил ($b = 45$ мм; $L = 135$ мм). Затем этот образец испытывался на трёхточечный изгиб при расположении тензодатчиков между одной из опор и линией приложения

силы P . В обоих случаях осуществлялась запись зависимости деформаций от нагрузки. При трёхточечном нагружении модуль сдвига рассчитывали в линейной зоне зависимости $P \sim \varepsilon_i$, используя формулу

$$G_{xy} = \frac{0.5P}{F(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad (2)$$

Для четырёхточечного изгиба этот модуль сдвига определялся по формуле (1).

Для каждого типа материала испытывалось по два образца. Один и тот же образец последовательно применялся в обоих методах. Полученные при этом значения модуля сдвига G_{xy} для каждого образца представлены в таблице 3, соответственно, сверху – для первого, снизу – для второго образца.

Таблица 3.

Значения модулей сдвига КМ (ГПа), определённых четырёхточечным и трёхточечным изгибом призматических образцов.

Метод определения	Тип материала и его толщина, мм				
	СП1:1, 13	УП1:1, 8,3	УП-6, 7,5	УУК-2, 10	СТ 10
Четырёхточечный изгиб G_{xy}	4,24	5,17	35,44	6,72	70,00
	4,05	4,93	35,16	6,83	
Трёхточечный изгиб G_{xy}	4,14	5,17	35,21	6,90	75,03
	4,20	4,95	35,17	7,02	
Трёхточечный изгиб G_{xz}	3,65	2,66	2,86	7,50	
	3,49	2,74	2,96	7,66	

Примечание: СТ – сталь.

Данные, приведённые в таблице 3, показывают хорошую согласованность значений G_{xy} для всех исследованных типов КМ. Это даёт основание на практическое применение метода трёхточечного изгиба призматических образцов для определения модулей сдвига в трёх главных плоскостях упругой симметрии ортотропного КМ, а также для оценки возможности его использования для определения модуля межслойного сдвига. Поэтому те же образцы, с наклеенными тензодатчиками по торцевым поверхностям (см. рис.7), были испытаны на трёхточечный изгиб. Значения модуля межслойного сдвига G_{xz} , рассчитанные по формуле (2), также приведены в таблице 3, откуда видна приемлемость данного метода для его оценки. Полученные экспериментальные данные показывают, что для КМ с углеродной матрицей, изготовленных на основе углеродной ткани, прошитой в трансверсальном направлении, значения G_{xz} превышают значения модуля сдвига в плоскости основного армирования, G_{xy} , в то время как для КМ, изготовленных на основе полимерной матрицы, значения G_{xz} наоборот, существенно ниже, чем значения G_{xy} . Данный факт, несомненно, заслуживает учёта при обеспечении надёжной работы конструкционных деталей из КМ.

Практическое использование трёхточечного метода для оценки сдвиговых свойств КМ будет способствовать повышению надёжности их применения в деталях конструкционного назначения.

ВЫВОДЫ

Модификация метода четырёхточечного изгиба за счёт создания равных пролётов между точками приложения усилий и передачи общей нагрузки от верхнего захвата испытательной машины через шарнир обеспечивает приложение усилий к образцу согласно заданной схеме нагружения и создаёт хорошие условия для его использования.

Метод бинарного нагружения даёт возможность нагружать образец одинаковыми усилиями согласно заданной схеме, что обеспечивает высокую стабильность результатов испытаний и хорошую их согласованность с результатами, полученными первым методом.

Метод трёхточечного нагружения образца на поперечный изгиб является наиболее простым и удобным для практического использования. Он позволяет определять также и модуль межслойного сдвига КМ. Всё это делает его весьма перспективным. Его широкое внедрение требует установления оптимального отношения длины пролёта к толщине образца, что позволит существенно сократить расход материалов.

Все три метода являются универсальными, то есть позволяют получать стабильные и достоверные значения модулей сдвига в трёх главных плоскостях упругой симметрии ортотропных КМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович А.Л. *Введение в механику армированных полимеров*. – М.: Наука, 1970. – 482 с.
2. Васильев В.В. и др. *Композиционные материалы: Справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. Гарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. *Методы статических испытаний армированных пластиков*. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
4. Harrison S.G., Hindman D. *Test method comparison of shear modulus evaluation of MSR and SCL products* // *Forest Products Journal*. – 2007. – Vol.57. – No.7. – Pp.32-38.
5. Щербакова А.О., Сапожников С.Б. *Влияние радиуса закругления опор на точность определения модуля межслойного сдвига армированных пластиков из испытаний коротких балок на изгиб* // *Известия Челябинского научного центра УРО РАН*. – 2001. – №2. – С.101-110.
6. Ogorkiewicz R.M., Mucci P.E.R. *Testing of fibre-plastics composites in three-point bending* // *Composites*. – 1971. – Vol.2. – No.3. – Pp.139-145.
7. Мое Хеин Зин, Хту Йе Тинт, Киреев В.А. *Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов* // *Труды МФТИ*. – 2018. – Т.10. – №2. – С.136-145.
8. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. *Моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканого препрега при испытаниях на изгиб и межслойной сдвиг методом короткой балки* // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2015. – Т.8. – №3. – С.264-272.
9. Михеев П.В., Муранов А.Н., Гусев С.А. *Экспериментальное определение модуля межслойного сдвига слоистого углепластика* // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2015. – №4(140). – С.46-50.
10. Chen C., Poursatirip A., Fernlund G. *A novel method to measure laminate shear modulus development of interlayer toughened composite laminates during the*

- curing process* / Conference proceedings of the American society for composites – 34 Technical conference. – Atlanta, 2019. <https://DOI:10.1278/asc.34/31316>
11. Botz M., Krause M., Siebert G. *Experimental determination of the shear modulus of polymeric interlayers used in laminated glass* / Materials of conference: GlassCon Global. – Chicago, 2018. <https://researchgate.net/publication/327631850>
 12. Adams D. *A comparison of shear test methods* // Composites World. – 2009. <https://compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods>.
 13. Жигун В.И., Плуме Э.З., Муйжниекс К.И., Краснов Л.Л. *Простые и надёжные методы определения модулей сдвига конструкционных материалов* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2019. – Т.25. – №4. – С.473-491.
 14. Жигун В.И., Плуме Э.З., Краснов Л.Л., Душин М.И. *Оценка достоверности значений модулей сдвига композитов, определяемых методом ASTM D5379/D5379M – 12 (ГОСТ Р 56799 – 2015)* / Материалы XIV международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – М.: РАН, 2019. – Т.1. – С.3-12.
 15. Поляков В.А., Жигун И.Г. *Контактная задача для балок из композиционных материалов* // Механика полимеров. – 1977. – №1. – С.63-74.
 16. Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
 17. Berg C.A., Tirosh J., Israeli M. *Analysis of short beam of fiber reinforced composites* / Composite Materials: Testing and design (second conference). ASTM STP №497. Pa. – 1972. – Pp.206-218.

REFERENCES

1. Rabinovich A.L. *Vvedenie v mekhaniku armirovannykh polimerov [Introduction into reinforced polymers mechanics]*. Moskva, Nauka, 1970, 482 p.
2. Vasil'ev V.V. etc. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite materials: Handbook]*. Moskva, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
3. Tarnopol'skii Yu.M., Kincis T.Ya. *Metody staticheskikh ispytanij armirovannykh plastikov [Methods of static testing of reinforced plastics]*. Moskva, Khimiya, 1981, 272 p.
4. Harrison S.G., Hindman D. *Test method comparison of shear modulus evaluation of MSR and SCL products*. Forest Products Journal, 2007, Vol.57, No.7, Pp.32-38.
5. Scherbakova A.O., Sapozhnikov S.B. *Vliyanie radiusa zakrugleniya opor na tochnost' opredeleniya modulya mezhslonogo sdviga armirovannykh plastikov iz ispytanij korotkikh balok na izgib [Support rounding radius influence on the reinforced plastic interlayer shear module finding accuracy from the short beam bending test]*. Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra URO RAN, 2001, No.2, Pp.101-110.
6. Ogorkiewicz R.M., Mucci P.E.R. *Testing of fibre-plastics composites in three-point bending*. Composites, 1971, Vol.2, No.3, Pp.139-145.
7. Moe Hein Zin, Htoo Ye Tint, Kireev V.A. *Sravnenie metodik opredeleniya uprugikh i prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov [Comparison of methods of determination of elastic and strength characteristics in polymer composite materials]*. Trudy MFTI, 2018, Vol.10, No.2, Pp.136-145.
8. Laptev M.Y., Adamov A.A. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanogo preprega pri ispytaniyakh na izgib i mezhslonovoj sdvig metodom korotkoj balki [Modelling*

- of deformation behavior of polymeric woven fabric prepreg-based composite materials in flexure and short beam interlaminar shear testing*]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2015, Vol.8, No.3, Pp.264-272.
9. Mikheev P.V., Muranov A.N., Gusev S.A. *Ehksperimental'noe opredelenie modulya mezhslonjogo sdviga sloistogo ugleplastika [Experimental definition of the module of interlayered shift of the layered carbon fibre reinforced plastic]*. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2015, No.4, Pp.46-50.
 10. Chen C., Poursatirip A., Fernlund G. *A novel method to measure laminate shear modulus development of interlayer toughened composite laminates during the curing process*. Conference proceedings of the American society for composites – 34 Technical conference. Atlanta, 2019. <https://DOI:10.1278/asc.34/31316>
 11. Botz M., Krause M., Siebert G. *Experimental determination of the shear modulus of polymeric interlayers used in laminated glass*. Materials of conference: GlassCon Global. Chicago, 2018. <https://researchgate.net/publication/327631850>
 12. Adams D. *A comparison of shear test methods*. *Composites World*, 2009. <https://compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods>
 13. Zhigun V.I., Plume E.Z., Muiznieks K.I., Krasnov L.L. *Prostye i nadyozhnye metody opredeleniya modulej sdviga konstrukcionnykh materialov [Simple and reliable methods for determining the shear moduli of structural materials]*. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2019, Vol.25, No.4, Pp.473-491.
 14. Zhigun V.I., Plume E.Z., Krasnov L.L., Dushin M.I. *Otsenka dostovernosti znachenij modulej sdviga kompozitov, opredelyaemykh metodom ASTM D5379/D5379M – 12 (GOST R 56799 – 2015) [Estimation of reliability of values of shear modules of composites determined by ASTM D5379/5379M – 12 method (GOST R 56799 – 2015)]*. *Materialy XIV mezhdunarodnogo simpoziuma «Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki»*, Moskva, RAN, 2019, Vol.1, Pp.3-12.
 15. Polyakov V.A., Zhigun I.G. *Kontaktnaya zadacha dlya balok iz kompozitsionnykh materialov [Contact problem for composite beams]*. *Mekhanika polimerov*, 1977, No.1, Pp.63-74.
 16. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov [Strength of materials]*. Moskva, Nauka, 1967, 552 p.
 17. Berg C.A., Tirosh J., Israeli M. *Analysis of short beam of fiber reinforced composites*. *Composite Materials: Testing and design (second conference)*. ASTM STP №497. Pa., 1972, Pp.206-218.

Поступила в редакцию 16 июля 2020 года.

Сведения об авторах:

Жигун Валерий Иванович – д.т.н., н.с., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: goracij.goracij@yahoo.com

Плуме Эгил Зигурдович – д.и.н., дир., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: egils@pmi.lv

Муйжниецс Карлис Индрикович – науч.асс., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия

Краснов Лаврентий Лаврентьевич – к.т.н., доц., нач. сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Россия