

doi: 10.5862/MCE.62.5

Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге

The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear

*Студент А.А. Болдырева,
студент Ю.А. Яруничева,
студент А.В. Дернакова,
аспирант И.В. Ивашов,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Санкт-
Петербург, Россия*

*A.A. Boldyreva,
Y.A. Yarunicheva,
A. V. Dernakova,
I.I. Ivashov,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, postaddress*

Ключевые слова: межслойный сдвиг;
композит; стеклопластик; полимер;
трехточечный изгиб; короткая балка

Key words: shear; composite; fiberglass;
polymer; three-point bending; short beam

Аннотация. Многослойные стеклопластики – первые практически освоенные волокнистые композиционные материалы. Предел прочности межслойного сдвига является одним из основных параметров, необходимых для расчета конструкций из слоистых композитов. Было проведено испытание образцов многослойного стеклопластика на предел прочности при межслойном сдвиге методом трехточечного изгиба короткой балки, а также исследовано влияние расстояния между опорами на значение предела прочности межслойного сдвига. Испытания проводились на машине Instron 5965 с использованием стандартной оснастки для трехточечного изгиба, а также цифрового USB-микроскопа DigiMicro 2.0 для отслеживания и фиксации момента появления в образцах трещин, соответствующих межслойному сдвигу. Результатом работы стала оценка применимости метода трехточечного изгиба к определению предела прочности многослойных композитов при межслойном сдвиге. Также было проведено сравнение картин разрушения стеклопластиков другого соотношения полимерной матрицы и стеклянных волокон.

Abstract. Multilayered fiberglasses are the first practically used fibrous composites. The ultimate interlaminar shear strength is one of the key parameters that is necessary to calculate constructions made of laminated composites. This paper presents the test of multilayer fiberglass exemplars for ultimate interlaminar shear strength carried out by means of the Short Beam Shear test. The research of the influence of the distance between pillars on a value of ultimate interlaminar shear strength is presented. Tests have been conducted using an Instron 596 testing machine with the aid of the equipment for a three-point bend and a digital USB microscope of DigiMicro 2.0 for tracking and fixation of the moment of emergence in exemplars of the interlaminar shear cracks. The work results in the feasibility assessment of Short Beam Shear test to define ultimate interlaminar shear strength.

Введение

В настоящее время в сфере строительства всё большую популярность приобретают композиционные материалы, или композиты. Композит – сплошной продукт, состоящий из двух и более материалов, отличных друг от друга по форме, фазовому состоянию, химическому составу, свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители.

Одним из наиболее известных композиционных материалов является многослойный стеклопластик, состоящий из нескольких слоев полимерной матрицы и стеклянных волокон. Многослойные стеклопластики – первые практически освоенные волокнистые композиционные материалы. Главными преимуществами стеклопластика являются малый удельный вес, низкая теплопроводность, высокая прочность в направлении армирования, химическая и влагостойкость. Благодаря этим свойствам его часто используют для производства морских и речных судов; в гражданском строительстве стеклопластик применяется для производства оконных рам, дверей, сборных каркасов малоэтажных домов и мобильных временных жилищ [1]. Также стеклопластик Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В. Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62) С. 42-50

используется в производстве арматуры, труб различного назначения, вентиляционных систем, тонких рулонных покрытий, а также многослойных панелей. Стеклопластики обладают хорошими параметрами радиопрозрачности, что позволяет использовать их для изготовления различных укрытий для антенн и локаторов.

Таким образом, многослойный стеклопластик в основном используется в оболочечных конструкциях, для расчета прочности и определения ресурса которых необходимым параметром является предел прочности при межслойном сдвиге в силу анизотропии свойств материала. Точное определение предела прочности при межслойном сдвиге является достаточно сложной задачей: существует большое количество экспериментальных методов, но большинство из них не обеспечивает однородность напряженного состояния, а потому обладает низкой точностью. Более точные методы требуют специального оборудования, сложной геометрии образцов и использования тензорезисторов. В данной статье рассматривается применение относительно простого метода испытания короткой балки.

Обзор литературы

Основной сложностью в проведении испытаний на межслойный сдвиг является получение однородного поля напряжений, что породило огромное количество методов испытаний, которых на сегодняшний день существует более десятка. Подробные обзоры представлены в [1–3], [4–8]. Большинство методов, описанных в [1], не получили широкого распространения ввиду их недостаточной точности, сложности изготовления образцов и проведения экспериментов. Обзор [2] дает заключение, что единственным точным методом можно признать метод Iosipescu (рис. 1), который требует специального оборудования, использования тензорезисторов и образцов сложной геометрии. Обзор современных методов [3] показывает, что на сегодняшний день наряду с Iosipescu однородное напряженное состояние можно получить с помощью метода V-Notched Rail Shear (рис. 1), но на практике сложность его проведения тоже достаточно высока.



Рисунок 1. Оборудование для методов Iosipescu (слева) и V-Notched Rail Shear (справа)

Наиболее простым, но дающим достаточно хорошую оценку предела прочности межслойного сдвига является трехточечный изгиб короткой балки (short beam shear test) [1–3]. Часто в литературе предел прочности, полученный при таком испытании, называют кажущимся пределом прочности при межслойном сдвиге (apparent shear strength) ввиду присутствия сложного напряженного состояния. Особенностью таких испытаний является необходимость обеспечения разрушения по касательным напряжениям [1], [9], [10–12], то есть обеспечение моды разрушения, соответствующей разрушению сдвигом. Другим недостатком этого вида испытания является невозможность точного определения модуля сдвига, в то время как методы Iosipescu и V-Notched Rail Shear позволяют сделать это с достаточно высокой точностью. В статье [8] показано, что можно получить достаточно точные значения модуля сдвига лишь при очень низком его значении по сравнению с продольным модулем Юнга.

Испытания регламентируются стандартами [4–7], в которых описываются приемлемые моды разрушения, а также геометрические размеры образца, расстояние между опорами, радиусы закругления опор и нагружающего элемента. Эти параметры различны во всех рассмотренных стандартах; представляет интерес обоснование выбора именно таких значений. Также стандарты

Boldyreva A.A., Yarunicheva Y.A., Dernakova A. V., Ivashov I.I. Prochnost' polymernogo kompozita (stekloplastika) pri mezhsloynom sdvige [The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 42-50. doi: 10.5862/MCE.62.5

[4–7] допускают возможность использования образцов различных размеров, но значения радиусов закругления опор и нагружающего элемента остаются неизменными, что несомненно может давать разные результаты для образцов разных размеров из одного и того же материала, что также отмечается в статье [9]. В статьях [9], [10] представлен анализ влияния радиуса закругления нагружающего элемента, а также расстояния между опорами на значение предела прочности. Эти параметры значительно влияют на моду разрушения: при слишком большом радиусе и/или малом расстоянии между опорами происходит смятие образца, при большом расстоянии между опорами увеличивается влияние растягивающих и сжимающих напряжений, при малом радиусе нагружающего элемента возникает большая локальная неоднородность напряжений. Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге, когда расстояние между опорами слишком маленькое или слишком большое, не может считаться достоверной из-за возникновения посторонних деформаций [20–22].

В соответствии с [10] для разрушения по касательным напряжениям необходимо обеспечить соотношение:

$$4 < s / h < 9, \quad (1)$$

где s – расстояние между опорами;
 h – толщина образца.

Но также отмечается, что значение кажущегося предела прочности межслойного сдвига значительно увеличивается при уменьшении расстояния между опорами и приближается к значению, полученному методом Iosipescu. В стандартах устанавливаются следующие значения параметра : [4],[5],[7] – 5, [6] – 4.

В работах [12], [13] показано, что для композитов на основе арамидного волокна при кажущийся предел прочности оказывается примерно на 20 % ниже реального предела прочности межслойного сдвига. Также представлена аналитическая зависимость для нахождения предела прочности межслойного сдвига из кажущегося предела прочности при использовании предела прочности на сжатие.

Постановка задачи

Целью работы является определение кажущегося предела прочности межслойного сдвига методом трехточечного изгиба для многослойного стекловолоконного композита, а также исследование влияния расстояния между опорами на значения предела прочности и получаемой моды разрушения.

Методика проведения эксперимента

Исследуется многослойный стекловолоконный композит, матрица – полиэфирная смола, волокно – стеклоткань полотняного плетения плотностью 300 г/м². Материал изготовлен методом ручной выкладки, содержание стекловолокна в объеме композита около 40 %. Испытания проводились на машине Instron 5965, с использованием стандартной оснастки для трехточечного изгиба, с радиусами закругления опор и нагружающего элемента мм. Учитывая, что в стандартах [4–7] регламентируются опоры меньшего радиуса, образцы выбирались больших размеров: длина мм, толщина мм, ширина мм. Нагружение проводилось с постоянной скоростью, управление производилось по перемещениям, поэтому данная величина имеет размерность [мм/с]: мм/с. Схема испытания представлена на рисунке 2.

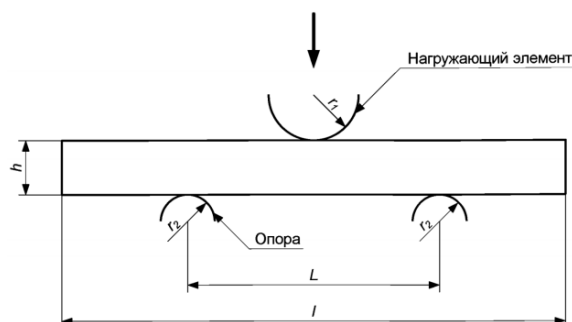


Рисунок 2. Схема нагружения из [4]

Испытания проводились на 14 образцах, разделенных на 4 группы. Испытания для каждой группы образцов проводились при различных значениях расстояния между опорами, в соответствии с соотношением (1). Для каждого образца была построена диаграмма разрушения, где Δx – это перемещение нагружающего элемента, для контроля моды разрушения образцов использовался USB микроскоп: делалась серия фотографий, которая сопоставлялась с диаграммой разрушения и по диаграмме определялась максимальная сила F_{\max} , которая вызвала разрушение по межслойному сдвигу. Кажущийся предел прочности межслойного сдвига высчитывался по формуле:

$$\tau_{\max} = \frac{3 F_{\max}}{4 bh}, \quad (2)$$

где τ_{\max} – предел прочности при межслойном сдвиге, МПа;

F_{\max} – максимальная нагрузка, Н;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

Результаты испытаний

Результаты проведения экспериментов и вычислений представлены в таблицах 1–4 и на рисунках 3–6.

Таблица 1. Результаты вычисления кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге при $s = 14$ мм

№ п/п	b, мм	h, мм	F_{\max} , Н	τ_{\max} , МПа
1	15.860	2.677	1779	31.426
2	14.723	2.793	1716	31.298
3	15.440	2.790	1454	25.319
4	15.893	2.663	1576	27.926

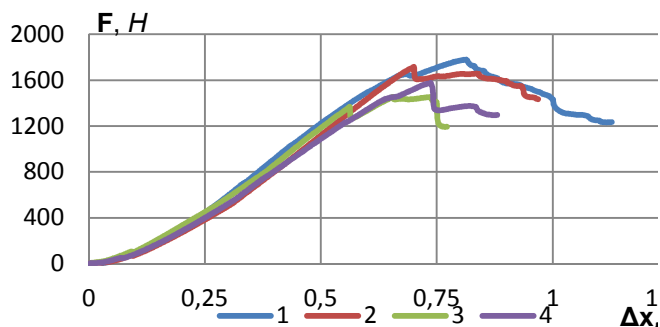


Рисунок 1. Диаграмма разрушения для $s = 14$ мм (образцы 1–4)

Таблица 2. Результаты вычисления кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге при $s = 16$ мм

№ п/п	b, мм	h, мм	F_{\max} , Н	τ_{\max} , МПа
5	15.5	2.70	1601	28.694
6	14.6	2.69	1620	30.944
7	15.96	2.70	1827	31.801
8	15.88	2.703	1537	26.848

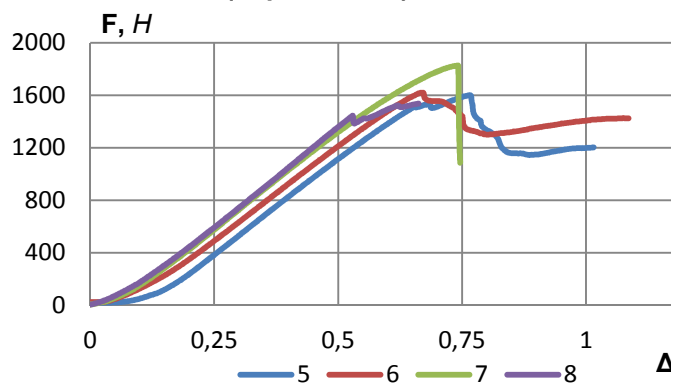


Рисунок 2. Диаграмма разрушения для $s = 16$ мм (образцы 5–8)

Таблица 3. Результаты вычисления кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге при $s = 18$ мм

№ п/п	b, мм	h, мм	F_{max}, H	T_{max}, MPa
9	15.093	2.817	1293	22.814
10	15.717	2.717	1395	24.514
11	15.293	2.773	1572	27.803

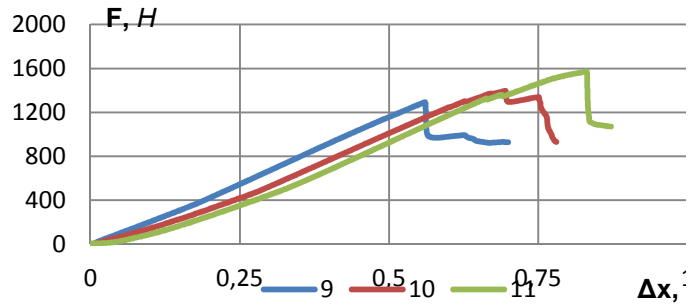


Рисунок 3. Зависимость прочности при $s = 18$ мм (образцы 9–11)

Таблица 4. Результаты вычисления кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге при $s = 20$ мм

№ п/п	b, мм	h, мм	F_{max}, H	T_{max}, MPa
12	15.513	2.703	1663	29.759
13	16.08	2.767	1473	24.842
14	15.85	2.657	1444	25.724

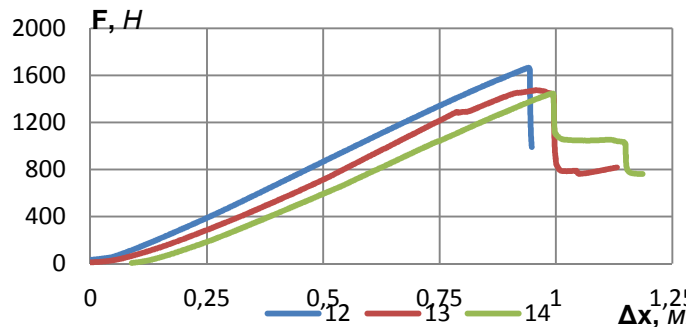
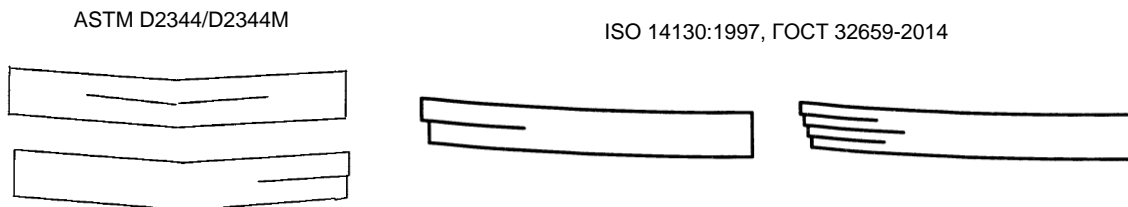


Рисунок 4. Зависимость прочности при $s = 20$ мм (образцы 12–14)

Анализ результатов

В соответствии со стандартами [4–7] схематичные представления мод разрушения, которые могут получиться в результате эксперимента, выглядят следующим образом:

Моды разрушения по сдвигу



Смешанные моды разрушения

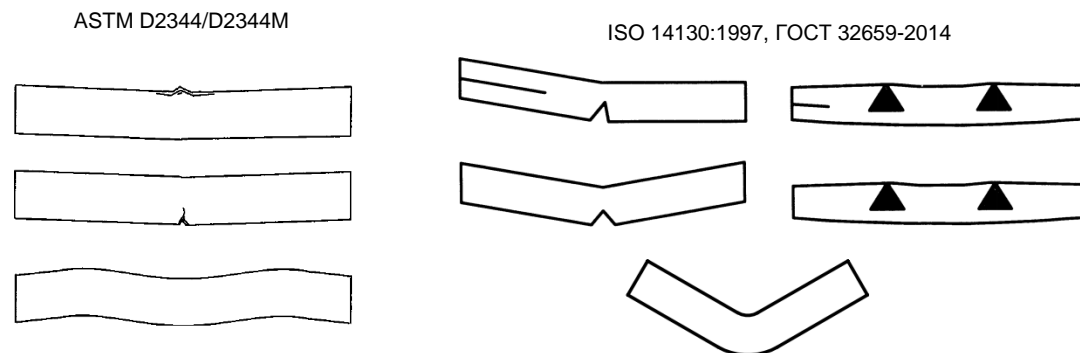


Рисунок 7. Схематичное изображение возможных мод разрушения: слева стандарт [6], справа стандарты [4], [5]. Приемлемыми считаются только чистые моды разрушения по межслойному сдвигу

С помощью микроскопа для каждого образца были получены фотографии, которые впоследствии сравнивались со схематическими изображениями на рисунке 7. Типичные моды разрушения показаны на рисунке 8.

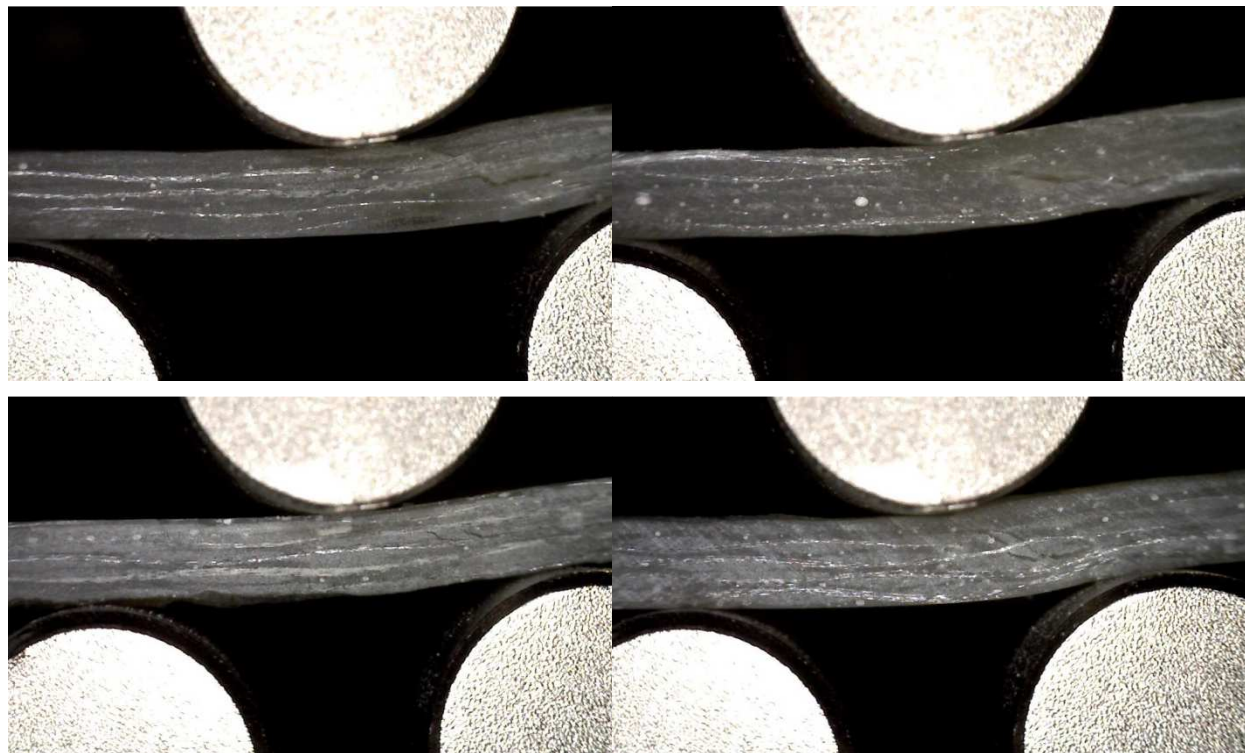


Рисунок 8. Типичные моды разрушения, полученные в результате испытаний

Полученные моды разрушения не похожи на те, что представлены в стандартах [4–7] в качестве допустимых, но трещина во всех случаях появляется вблизи срединной линии, что указывает на разрушение вследствие действия касательных напряжений. Схожая картина разрушения показана в статье [11] при исследовании композитов из углеродного волокна, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов. Такой тип разрушения, скорее всего, возникает из-за высокого содержания смолы: разрушение происходит в интерфейсном слое по критерию максимальных нормальных напряжений, в результате чего возникают трещины под углом 45° к оси балки, которые видны на рисунке 8. Также после изучения образцов, прошедших испытания, можно сказать, что разрушение происходит лишь в матрице композита, так как получившаяся трещина закрывается после снятия нагрузки.

Два образца были исключены из выборки (образцы № 1, 3), так как их моды разрушения имеют смешанный характер (рис. 9).

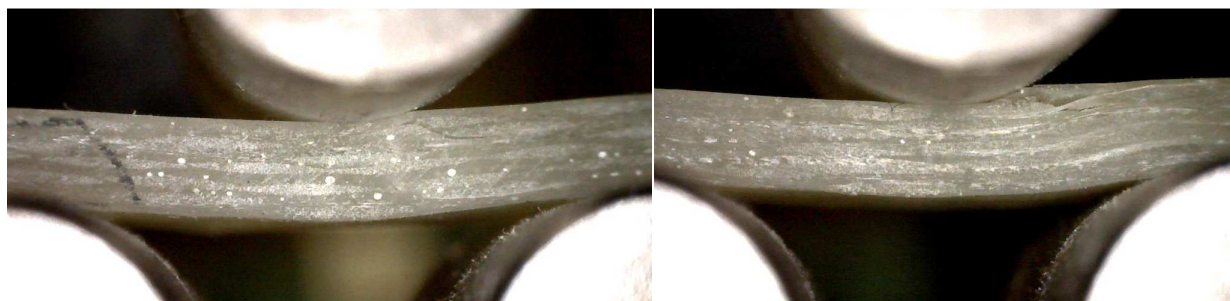


Рисунок 9. Образцы №1 и №3 со смешанными модами разрушения

После нахождения усреднённого значения кажущегося предела прочности межслойного сдвига для каждого расстояния между опорами был построен график зависимости предела прочности при межслойном сдвиге от расстояния между опорами (табл. 6, рис. 10), который

Boldyreva A.A., Yarunicheva Y.A., Dernakova A. V., Ivashov I.I. Prochnost' polimernogo kompozita (stekloplastika) pri mezhslaynom sdvige [The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 42-50. doi: 10.5862/MCE.62.5

аналогичен графикам из [10] для композитов из углеволокна. Также интересный факт отмечается в [9]: ранние версии стандарта [7] регламентируют значение параметра для стекловолоконистых композитов и для всех остальных армированных композитов, что означает появление смешанных мод вблизи этих значений. В нашем случае смешанные моды появились при значениях.

Таблица 6. Среднее значение кажущегося предела прочности, полученного при различных расстояниях между опорами

S, мм	$\langle \tau_{max} \rangle$, МПа
14	29.612
16	29.572
18	25.044
20	26.775

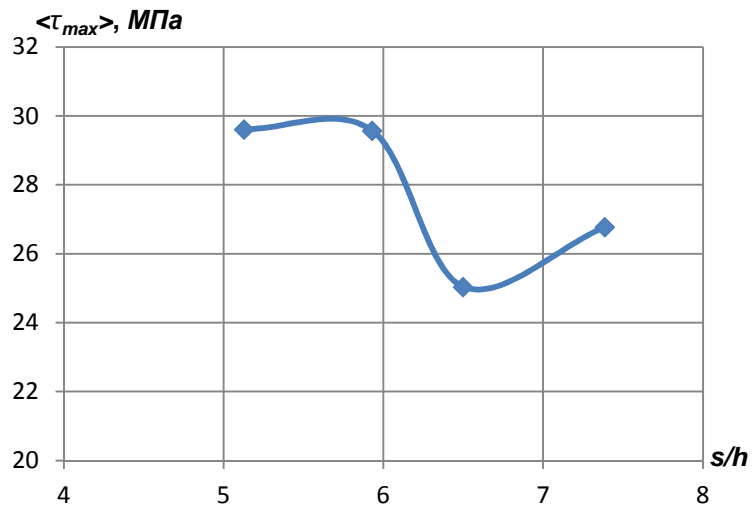


Рисунок 6. График зависимости усредненного значения кажущегося предела прочности межслойного сдвига от параметра s/h

Выводы

Исходя из анализа результатов проведенных испытаний на определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом трехточечного изгиба короткой балки, а также материалов других работ, можно сделать следующие выводы:

1. Метод трехточечного изгиба короткой балки может успешно применяться для оценки предела прочности стеклопластиков при межслойном сдвиге при соблюдении некоторых условий. Расстояние между опорами должно быть достаточно малым, чтобы снизить влияние сжатия вдоль волокон, и достаточно большим, чтобы исключить значительное сжатие поперек плоскости слоев. Показано, что для испытанного стеклопластика, при использовании оснастки с радиусами опор и нагружающего элемента мм, приемлемым соотношением между расстояния между опор и толщиной образца является .

2. Картины разрушения образцов не соответствуют указанным в стандартах, что объясняется достаточно низким содержанием стекловолокна в объеме композита: разрушение происходит только в матрице по критерию максимальных нормальных напряжений, о чем свидетельствуют характерные трещины, возникающие под углом 45° к оси балки вблизи срединной линии. Схожая картина разрушения обнаружена и для других композитов [11].

3. Несмотря на то, что кажущийся предел прочности межслойного сдвига оказывается ниже реального предела прочности, его значение можно уточнить, используя аналитическое выражение из [12], для которого требуется значение предела прочности на сжатие вдоль волокон.

Литература

1. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я, Методы статических испытаний армированных пластиков, М.: Изд-во ХИМИЯ МОСКВА, 1981, 270 с.
2. Test methods for composites A status report, shear test method, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1993, 30-31 с.
3. Don Adams, A comparison of shear test methods [Электронный ресурс]. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods> (дата обращения: 10.01.2016)
4. Сибгатуллин К.Э., Сибгатуллин Э.С. Оценка прочности слоистоволокнистых композиционных материалов

References

1. Tarnopolskiy Yu.M., Kintsis T.Ya, *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov* [Methods of static testing of reinforced plastics]. Moscow: KhIMIYa MOSKVA, 1981. 270 p. (rus)
2. Test methods for composites A status report, shear test method, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1993. pp. 30-31.
3. Adams D. A comparison of shear test [online]. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods> (accessed: 10 January 2016)
4. Sibgatullin K.E., Sibgatullin E.S. Otsenka prochnosti sloistovoloknistykh kompozitsionnykh materialov struktury $[\pm]c$ [Strength valuation of $[\pm]c$ structured fibrous

Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В. Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62) С. 42-50

- структуры [±]с // Механика композиционных материалов и конструкций. 2008. Т.14. №4. С. 572-582.
5. Доан Чак Луат., Дудченко А.А., Лурье С.А. Моделирование деградации свойств композита при растрескивании и расслоении при статическом и циклическом нагружении // Механика композиционных материалов и конструкций. 2008. Т.14. №4. С. 623-637
 6. Гаврюшина Н. Т., Букеткин Б. В. Исследование прочности армированных композитных образцов при трехточечном изгибе // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12.
 7. Димитриенко Ю. И., Губарева Е. А., Яковлев Д. О. Асимптотическая теория вязкоупругости многослойных тонких композитных пластин // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. №10. с. 359-382.
 8. ГОСТ 32492-2013. Изделия профильные композитные полимерные для армирования строительных материалов конструкций Методы определения физико-механических характеристик, Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. 2013.
 9. Ziad K. Awad, ThiruAravinthan. Geometry effect on the behaviour of single and glue-laminated glass fibre reinforced polymer composite sandwich beams loaded in four-point bending. *Material and design*. 2012. No. 39.
 10. Yuliya K. Gulyaeva, Vasily V. Kaicheva, Vladimir I. Zaikovskii, Alexey P. Sukneva, Bair S. Bal'zhinimaeva, Selective hydrogenation of acetylene over Pd/Fiberglass catalysts: Kinetic and isotopic studies. *Applied Catalysis A: General*. 2015. No.506.
 11. Toshihiro Kogure, Ritsuro Miyawaki, Yasuyuki Banno. The true structure of wonesite, an interlayer-deficienttrioctahedral sodium mica. *American Mineralogist*. 2005. Pp. 725–731.
 12. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Яковлев Д.О. Асимптотическая теория вязкоупругости многослойных тонких композитных пластин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. №10. С. 359-382.
 13. Щербак А.О., Сапожников С.Б. Влияние радиуса закругления опор на точность определения межслойного модуля сдвига армированных пластиков из испытаний коротких балок изгиб // Известия Челябинского научного центра. 2001. №2(11).
 14. ГОСТ 32659-2014. Композиты полимерные методы испытаний, определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки, М.: Стандартиформ. 2014.
 15. ISO 14130.1997.
 16. ASTM D2344 / D2344M
 17. DIN EN 2563
 18. Don Adams, The short beam shear test method for composite material. [Электронный ресурс]. URL: www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test-method-for-composite-materials (дата обращения:10.01.2016)
 19. Don Adams, The short beam shear test. [Электронный ресурс]. URL: www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test (дата обращения: 10.01.2016)
 20. C. A. Steeves, N. A. Fleck. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling. *Mechanical sciences*. 2004. No. 46.
 21. Xiwen Jia, Zihui Xia, Bohong Gu. Numerical analyses of 3D orthogonal woven composite under three-point bending laminated composites] // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*. 2008. Vol.14. No.4. Pp. 572-582. (rus)
 5. Doan Chak Luat., Dudchenko A.A., Lurye S.A. Modelirovaniye degradatsii soystv kompozita pri rastreskivanii i rassloenii pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении [Modeling of composite properties degradation while bursting and exfoliation at static and cycling stressing] // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*. 2008. Vol.14. No.4. Pp. 623-637. (rus)
 6. Gavryushina N. T., Buketkin B. V. Issledovaniye prochnosti armirovannykh kompozitnykh obraztsov pri trekhtocheynom izgibe [Investigation of reinforced composite samples' strength at three-point bending]. *Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye*. MGTU im. N.E. Baumana. 2014.No.12. (rus)
 7. Dimitriyenko Yu. I., Gubareva Ye. A., Yakovlev D. O. Asimptoticheskaya teoriya vyazkouprugosti mnogoslonykh tonkikh kompozitnykh plastin [Asymptotic theory of viscoelasticity of multi-layer composite plates]. *Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye*. MGTU im. N.E. Baumana. 2014.No.10. pp. 359-382. (rus)
 8. GOST 32492-2013. Izdeliya profilnyye kompozitnyye polimernyye dlya armirovaniya stroitelnykh materialov konstruksiy Metody opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik [Composite profile polymeric production for reinforcing of building materials constructions Methods of determination of physical-mechanical characteristics]. *Yevraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii*. Minsk. 2013. (rus)
 9. Ziad K. Awad, ThiruAravinthan Geometry effect on the behaviour of single and glue-laminated glass fibre reinforced polymer composite sandwich beams loaded in four-point bending. *Material and design*. 2012. No. 39.
 10. Yu. K. Gulyaeva, V. V. Kaicheva, V. I. Zaikovskii, A. P. Sukneva, B. S. Bal'zhinimaeva. Selective hydrogenation of acetylene over Pd/Fiberglass catalysts: Kinetic and isotopic studies. *Applied Catalysis A: General*. 2015.No.506.
 11. Toshihiro Kogure, Ritsuro Miyawaki, Yasuyuki Banno. The true structure of wonesite, an interlayer-deficienttrioctahedral sodium mica. *American Mineralogist*. 2005. Pp. 725–731.
 12. Dimitriyenko Yu.I., Gubareva Ye.A., Yakovlev D.O. Asimptoticheskaya teoriya vyazkouprugosti mnogoslonykh tonkikh kompozitnykh plastin [Asymptotic theory of viscoelasticity of multi-layer composite plates]. *Nauka i obrazovaniye*. MGTU im. N.E. Baumana. 2014. No. 10. Pp. 359-382.
 13. Shcherbakova A.O., Sapozhnikov S.B. Vliyaniye radiusa zakrugleniya opor na tochnost opredeleniya mezhsloynogo modulya sdviga armirovannykh plastikov iz ispytaniy korotkikh balok izgib [Influence of rounding radius of supports on accuracy of determination of shift module of reinforced plastics from short beam test]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*. 2001. No.2(11).
 14. GOST 32659-2014 Kompozity polimernyye metody ispytaniy, opredeleniye kazhushchegosya predela prochnosti pri mezhsloynom sdvige metodom ispytaniya korotkoy balki [Polymeric composites testing methods, determination of seeming strength limit while interlaminar shift by short beam test], Moscow: Standartinform. 2014.
 15. ISO 14130.1997.
 16. ASTM D2344 / D2344M
 17. DIN EN 2563

Boldyreva A.A., Yarunicheva Y.A., Dernakova A. V., Ivashov I.I. Prochnost' polymernogo kompozita (stekloplastika) pri mezhsloynom sdvige [The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 42-50. doi: 10.5862/MCE.62.5

- from multi-scale microstructure approach. *Computational Materials Science*. 2013. No. 79.
22. Liwei Wu, Fa Zhang, Baozhong Sun, Bohong Gu. Finite element analyses on three-point low-cyclic bending fatigue of 3-D braided composite materials at microstructure level. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. No. 84.
 23. Jane Maria Faulstich de Paiva, Sergio Mayer. Mirabel Cerqueira Rezende. Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *SBPMAT*. 2003. Vol.2.
 18. Don Adams, The short beam shear test method for composite material. [online]. URL.: www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test-method-for-composite-materials (accessed:10 January 2016)
 19. Don Adams, The short beam shear test. [online]. URL.: www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test (accessed: 10.01.2016)
 20. Craig A. Steeves, Norman A. Fleck Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling. *Mechanical sciences*. 2004. No. 46.
 21. XiwenJia , ZihuiXia , BohongGu. Numerical analyses of 3D orthogonal woven composite under three-point bending from multi-scale microstructure approach. *Computational Materials Science*. 2013. No. 79.
 22. Liwei Wu, Fa Zhang, Baozhong Sun, BohongGu Finite element analyses on three-point low-cyclic bending fatigue of 3-D braided composite materials at microstructure level. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. No.84.
 23. Jane Maria Faulstich de Paiva, Sergio Mayer; Mirabel Cerqueira Rezende, Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *SBPMAT*. 2003. Vol.2.

Анастасия Андреевна Болдырева,
+7(921)7424287; эл. почта:
anastasiaboldyreva96@gmail.com
Юлия Алексеевна Яруничева,
+7(911)2314977; эл. почта:
julija.jarunicheva@gmail.com
Александра Вячеславовна Дернакова,
+7(911)7749023; эл. почта:
sasha231296@mail.ru
Илья Владимирович Ивашов,
+7(950)0323148; эл. почта:
i.ivashov55@gmail.com

Anastasia Boldyreva,
+7(921)7424287;
anastasiaboldyreva96@gmail.com
Yuliya Yarunicheva,
+7(911)2314977; julija.jarunicheva@gmail.com
Aleksandra Dernakova,
+7(911)7749023; sasha231296@mail.ru
Iliya Ivashov,
+7(950)0323148; i.ivashov55@gmail.com

© Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В., 2016