

ОЦЕНКА МЕЖСЛОЕВОЙ ПРОЧНОСТИ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

Антипов В.В.^{1*}, Прокудин О.А.^{2**}, Лурье С.А.^{2-3***},
Серебренникова Н.Ю.^{1****}, Соляев Ю.О.^{2-3*****}, Коновалов А.Н.^{1*****}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
Государственный научный центр Российской Федерации,
ВИАМ, ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

³ *Институт прикладной механики Российской академии наук,
ИПРИМ РАН, Ленинградский проспект, 7, Москва, 125040, Россия*

* e-mail: antipovvv@viam.ru

** e-mail: Prokudin_7713@mail.ru

*** e-mail: salurie@mail.ru

**** e-mail: serebrennikova-viam@mail.ru

***** e-mail: yos@iam.ras.ru

***** e-mail: konovalov_job@list.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.2019

Представлены результаты определения межслоевой прочности металлополимерного композиционного материала СИАЛа, образованного слоями алюминиевого сплава и однонаправленного стеклопластика. Исследованы образцы, состоящие из 17 слоев, для которых определена кажущаяся межслоевая прочность по результатам испытаний на трехточечный изгиб. Установлено, что для исследованных образцов реализуется механизмы межслоевого сдвига при соотношении размеров длины к толщине менее 10. Локализация разрушения происходит в зоне центрального слоя, что соответствует требованиям стандартов на проведение испытаний по методу короткой балки. Однако такие испытания СИАЛов всегда сопровождаются возникновением значительных пластических деформаций, связанных с присутствием алюминиевых слоев в структуре материала. При удлинении образцов более 10 в них реализуется механизм разрушения, при котором происходят отслоение и потеря устойчивости внешних слоев на сжатой стороне образца. На основе предложенной аппроксимации экспериментальных данных получена оценка для фактической межслоевой прочности материала, которая составила ~60 МПа.

Ключевые слова: алюмокомпозит, трехточечный изгиб, короткая балка, межслоевая прочность.

Введение

Слоистые алюмокомпозиты (СИАЛ, GLARE) являются перспективными конструкционными материалами для применения в конструкциях летательных аппаратов [1–5]. Эти композиционные материалы представляют собой слоистые панели, образованные чередующимися тонкими слоями из стеклопластика и из алюминиевых сплавов. По сравнению с металлами СИАЛы обладают повышенной удельной прочностью, длительной прочностью, огнестойкостью. Исследование зависимости механических свойств СИАЛов от

параметров их армирования представляет собой важную задачу, решение которой необходимо для проведения прочностных расчетов и проектирования оптимальных конструкций. Одной из важных характеристик, определяющих конструкционные свойства СИАЛов, как и других композиционных материалов, является межслоевая прочность.

Испытание образцов на трехточечный изгиб по методу «короткой балки» [6, 7] — один из наиболее простых методов определения межслоевой прочности композиционных материалов [8], он

широко применяется при исследовании и разработке композитных конструкций, так как не требует сложной экспериментальной оснастки и тензометрии. В то же время межслоевая прочность является важным параметром с точки зрения проектирования, так как она используется при формулировке критериев прочности композиционных материалов [8, 9], и в том числе при оценке прочности конструкций из СИАЛов. Возникновение межслоевых трещин может приводить к снижению несущей способности элементов конструкций и затем к их разрушению, например по механизму локальной потери устойчивости [10, 11].

Однако столь простой метод, как испытания на трехточечный изгиб, имеет и определенные недостатки, связанные, в первую очередь, с тем, что при таких испытаниях в образцах реализуется сложное напряженное состояние, т.е. возникают не только напряжения межслоевого сдвига, но и растягивающие/сжимающие напряжения, приводящие к погрешностям в определении характеристик материалов [8]. Сложность, которая возникает при испытании образцов на межслоевой сдвиг, помимо указанных погрешностей, связанных с неоднородным напряженным состоянием образцов, заключается также в том, что определяемая межслоевая прочность оказывается не константой материала, а зависит от расстояния между опорами. Эта проблема, известная и для обычных композиционных материалов [18–21], и для металлополимерных композитов [12–17], объясняется снижением касательных напряжений, реально действующих в коротких образцах (по стандартам относительное удлинение образцов должно составлять 5–10), по сравнению с классическими моделями балок, которые предполагают постоянное значение перерезывающей силы и, соответственно, постоянные значения касательных напряжений (с точностью до знака) по длине образца. Таким образом, применение обычного соотношения для оценки касательных напряжений, действующих в балке, по формуле $3P/(4bh)$ [6], приводит к повышению кажущейся межслоевой прочности материала. Кроме этого, влияние длины образца на результаты испытаний на межслоевую прочность объясняется:

- 1) концентрацией напряжений вблизи опор, для исключения которой применяются специальные оснастки [19];
- 2) статистической зависимостью прочности от размеров образца [20];
- 3) возникновением межслоевых трещин не на нейтральной оси образца [21];

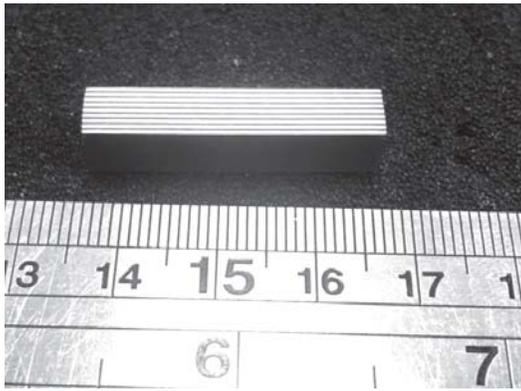
4) особенностями зависимости межслоевой прочности от параметров механики разрушения [22].

В последние годы появилось большое количество работ, в которых исследуется возможность определения межслоевой прочности металлополимерных композитов по методу «короткой балки» [12–17]. В СИАЛах разрушение по механизму межслоевого сдвига может происходить как на границе контакта металлических и композитных слоев, так и внутри композитных слоев. В первом случае, фактически, по результатам испытаний определяется адгезионная прочность контакта металл/композит при сдвиге, а во втором – собственная межслоевая прочность композитных слоев. Соответственно, в испытаниях удается определить только ту характеристику, которая имеет меньшее значение. Дополнительной особенностью, возникающей при испытании образцов СИАЛа по методу «короткой балки», является пластичность слоев алюминия, которая приводит к существенно нелинейной диаграмме нагрузка-перемещения, что, однако, не является препятствием для применения оценки касательных напряжений по классической формуле $3P/(4bh)$, которая справедлива для любых типов материалов, как упругих, так и пластичных. Поэтому основной задачей исследований с СИАЛами является определение степени погрешности, которая реализуется при использовании метода «короткой балки» по отношению к более точным, но и более трудоемким методикам испытаний. В частности, желательное получение оценок для значений «истинной» межслоевой прочности, не зависящей от размеров образца.

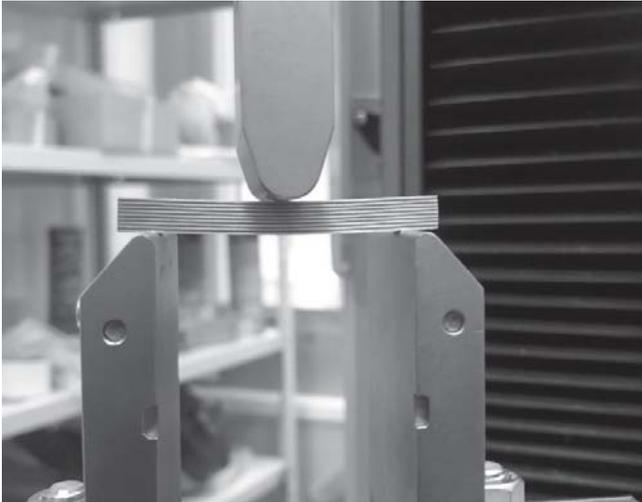
Экспериментальные методы

Для оценки межслоевой прочности СИАЛа по методу «короткой балки» были изготовлены образцы структуры 9/8 с однонаправленной схемой армирования композитных слоев (рис. 1,а). Толщина образцов составляла 5,5 мм, ширина 7 мм, а длина 20–170 мм. Толщины слоев стеклопластика и алюминиевого сплава составляли ~0,32 мм.

Выбор указанной структуры образцов обусловлен, во-первых, имеющимся оборудованием и диаметром опор в испытательной машине, которые не позволяют испытывать слишком короткие образцы, а применение 17-слойных СИАЛов толщиной 5,5 мм позволяет испытывать образцы длиной 25–55 мм (т. е. с удлинением 5–10, что соответствует стандартным требованиям) на имеющихся опорах.



а)



б)

Рис. 1. Образец 17-слоеного СИАЛа (а) для проведения испытаний по методу «короткой балки» (б)

Во-вторых, выбор однонаправленной структуры армирования позволяет снизить вероятность образования расслоений внутри композитных слоев и, таким образом, оценить межслоевую прочность контакта алюминий/композит. Использование каких-либо других схем армирования привело бы к первичному расслоению на внутренних наиболее ослабленных границах между слоями стеклопластика с разным направлением армирования. При этом в процесс работы предполагалось, что собственная межслоевая прочность композитных слоев известна либо может быть определена стандартными методами.

Третьим фактором, влияющим на выбор схемы армирования образцов, является необходимость локализации межслоевых трещин на границах, максимально близко расположенных к нейтральной оси образца. Здесь важно отметить, что межслоевые трещины в СИАЛах, даже если проходят по центру образца, всегда оказываются смещенными на половину толщины металлического слоя, располагаемого на нейтральной линии. Поэтому использование образцов большой тол-

щины позволяет снизить относительное смещение трещины от нейтральной оси и, следовательно, уменьшить погрешности вычислений по стандартной формуле, которая дает точные значения только в случае центрального расположения межслоевой трещины:

$$\bar{\tau} = \frac{3P}{4bh}, \quad (1)$$

где P – действующая нагрузка; b , h – ширина и толщина образца.

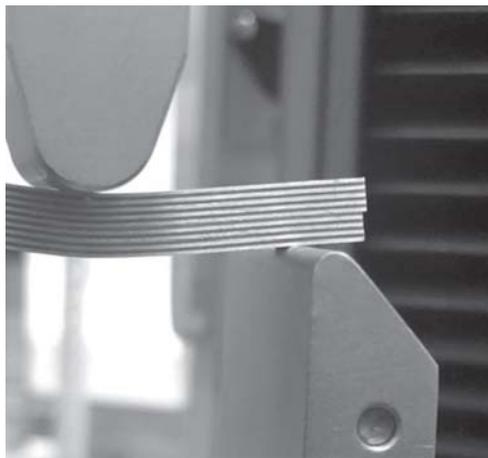
Испытания проводились на установке Instron 5969 (рис. 1, б) с нижними опорами диаметром 5 мм и с верхней опорой диаметром 10 мм. Скорость испытаний составляла 1 мм/мин. Испытания останавливались при падении нагрузки более чем на 50% от максимума. Результаты испытаний обрабатывались на основании формулы (1), в соответствии с которой определялась кажущаяся (условная) межслоевая прочность.

Результаты

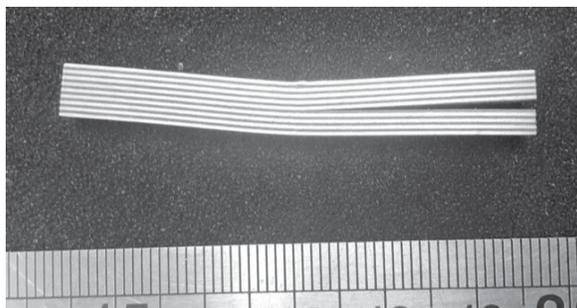
По результатам испытаний было установлено, что межслоевой сдвиг реализуется в образцах с удлинением не более 7–8. Характерный механизм разрушения хорошо наблюдался в процессе испытаний на боковых торцах всех образцов (рис. 2, а), однако после снятия нагрузки межслоевые трещины были хорошо различимы только в образцах с удлинением более 6 (рис. 2, б). Для образцов с удлинением более 10 механизм разрушения изменялся. Для таких образцов реализовывались отслоение и потеря устойчивости металлического слоя в сжатой области образца вблизи опоры (рис. 3). Для очень коротких образцов с удлинением менее 4 происходило смятие образцов, т. е. реализовывался механизм разрушения с большими поперечными деформациями («индентирование»).

Характерный вид диаграмм нагрузка-перемещение для образцов СИАЛа представлен на рис. 4. Видно, что при нагрузке выше 1000 Н диаграмма становится нелинейной, что объясняется возникновением пластических деформаций в слоях алюминия. При разрушении и возникновении межслоевой трещины происходит резкое падение нагрузки, что объясняется снижением изгибной жесткости образца [18].

Полученная в испытаниях зависимость разрушающей нагрузки от расстояния между опорами представлена на рис. 5. Здесь точками показаны экспериментальные данные, а линиями – теоретическая аппроксимация по соотношениям, при-



а)



б)

Рис. 2. Межслоевой сдвиг в образцах СИАЛа: а — смещение слоев в торцевой зоне образца; б — образец после проведения испытаний

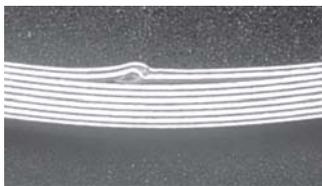
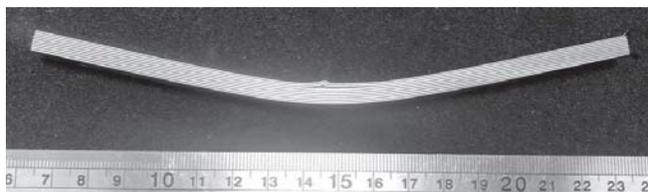


Рис. 3. Разрушение образцов большого удлинения

веденным ниже. Во-первых, из полученных результатов следует, что несущая способность образца снижается при увеличении расстояния между опорами, что качественно соответствует классическим решениям из теории сопротивления материалов. В частности, снижение разрушающей нагрузки может быть объяснено в предположении, что существует некоторая критическая величина сжимающих напряжений $\bar{\sigma}$, приводящая к отслоению верхнего металлического слоя (как на

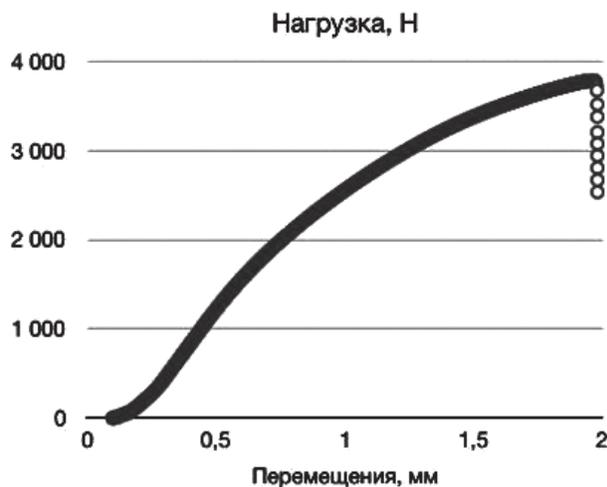


Рис. 4. Диаграмма нагрузка-перемещения, полученная при испытаниях образца СИАЛа на трехточечный изгиб

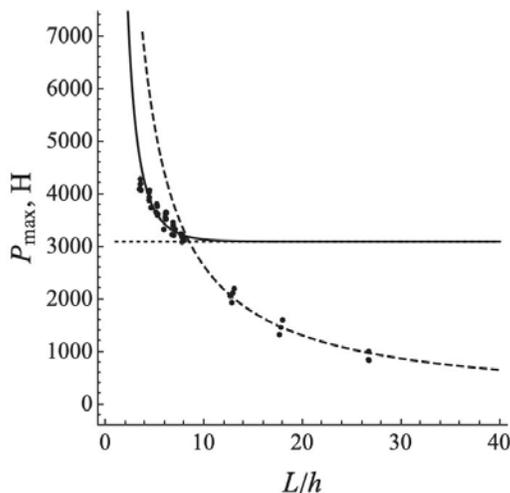


Рис. 5. Зависимость разрушающей нагрузки при изгибе от относительного расстояния между опорами, нормированного на толщину образца

рис. 3). Уровень напряжений в этом слое из-за его малой толщины можно считать постоянным, и находить его можно по классической балочной теории. Поэтому в момент разрушения мы имеем равенство:

$$\frac{3LP_{\max}}{2bh^2} = \bar{\sigma},$$

откуда следует оценка для максимальной нагрузки:

$$P_{\max} = \bar{\sigma} \frac{2bh^2}{3L}, \quad (2)$$

где все величины являются известными, кроме критических напряжений, величина которых была

подобрана для описания имеющихся экспериментальных данных $\bar{\sigma} = 1020$ МПа.

Записанная оценка (2) является качественной и приближенной, однако она показывает, что максимальная нагрузка в трехточечном изгибе обратно пропорциональна удлинению образца

$P_{\max} \sim (L/h)^{-1}$ для удлинений больше 10, и эта зависимость подтверждается экспериментом. Для меньших значений удлинений этот закон не работает, зависимость становится иной – механизм разрушения изменяется на межслоевой сдвиг по центру образца (рис. 2). Реализация такого механизма и является задачей проводимых испытаний. Однако из рис. 5 видно, что максимальная нагрузка при межслоевом сдвиге оказывается также зависящей от расстояния между опорами. Этот эффект известен для композиционных материалов, как было отмечено выше, однако он входит в противоречие с классическим решением теории сопротивления материалов: при трехточечном изгибе перерезывающая сила постоянна справа и слева от приложенной нагрузки и, следовательно, касательные напряжения аналогичным образом изменяются вдоль длины образца и не зависят от этой длины. Очевидно, в эксперименте этого не наблюдается.

Для описания полученной зависимости и для оценки истинной межслоевой прочности предлагается использовать модифицированное решение задачи о трехточечном изгибе, которое может быть получено в рамках модели балок, построенных в рамках градиентной теории упругости [24, 25]. Эта зависимость определяется следующим соотношением:

$$P_{\max} = \frac{4}{3}bh \frac{\tau_0}{1 - 1/\operatorname{ch}(L/(4d))}, \quad (3)$$

где τ_0 – истинная межслоевая прочность; d – масштабный параметр задачи, имеет размерность длины, и его значение должно коррелировать с диаметром опор, которые применяются в испытаниях. В частности, для очень тонких опор ($d \sim 0$) решение (3) выходит на классическое решение (1).

Для описания экспериментальных данных были подобраны значения указанных параметров решения (3):

- истинная межслоевая прочность $\tau_0 = 60,4$ МПа;
- масштабный параметр $d = 2,7$ мм (т. е. приблизительно радиус нижних опор, в зоне которых и происходит разрушение).

Полученная зависимость представлена на рис. 5 сплошной линией. Видно, что в случае малого удлинения образцов и механизма разрушения по межслоевому сдвигу решение (3) лучше описывает экспериментальные данные по сравнению с решением (2), а также, очевидно, и по сравнению с классическим решением, которое требует независимости несущей нагрузки от расстояния между опорами при межслоевом сдвиге. Нагрузка, соответствующая постоянной (истинной) межслоевой прочности 60,4 МПа, показана горизонтальной пунктирной линией на рис. 5.

Зависимость кажущейся межслоевой прочности от расстояния между опорами может быть получена комбинацией формул (1) и (3) в следующем виде:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_0}{1 - 1/\operatorname{ch}(L/(4d))}. \quad (4)$$

Эта зависимость представлена на рис. 6 (сплошная линия). Точками на этом рисунке показаны экспериментальные данные, полученные путем обработки результатов испытаний (см. рис. 5) с использованием формулы (1). Горизонтальный пунктир – вычисленная истинная межслоевая прочность. Отклонение соотношения (3) от эксперимента для самых коротких образцов может быть связано с изменением механизма их разрушения. Как было сказано, в таких образцах при разрушении возникают большие поперечные неупругие деформации.

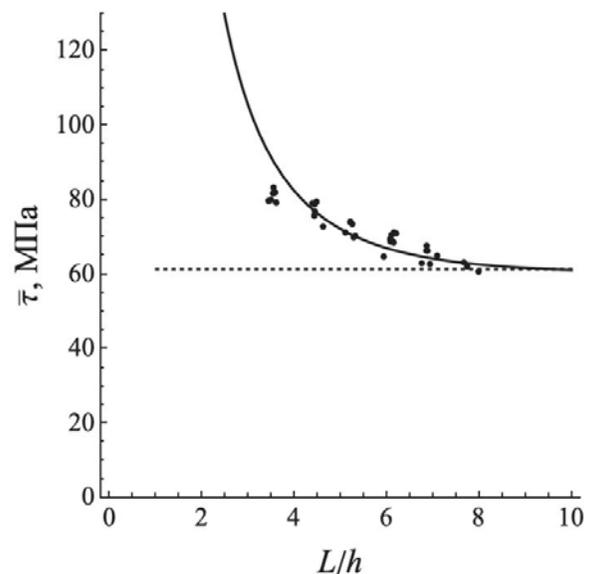


Рис. 6. Зависимость кажущейся межслоевой прочности от относительного расстояния между опорами в испытаниях по методу короткой балки. Точки – эксперимент, сплошная линия – формула (4)

Выводы

Предложена схема проведения испытаний образцов СИАЛа на межслоевой сдвиг по методу короткой балки. В испытаниях используются образцы с большим числом слоев и с однонаправленной схемой армирования, что позволяет снизить погрешность экспериментов при использовании стандартного оборудования. По результатам испытаний определена кажущаяся межслоевая прочность образцов, зависящая от расстояния между опорами. На основании расчетов показано соответствие полученных экспериментальных данных и теоретических оценок. Рассчитанное значение межслоевой прочности СИАЛа составило ~ 60 МПа, что соответствует типичному уровню межслоевой прочности полимерных композиционных материалов, однако в испытаниях разрушение реализовывалось на границе контакта металлических и композитных слоев, и это позволяет утверждать, что найденное значение межслоевой прочности является характеристикой контакта металл/композит, реализующейся в СИАЛе.

Образцы СИАЛа изготовлены в рамках реализации комплексного научного направления б.2: Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») в ВИАМ. Часть исследований, связанная с проведением испытаний и расчетов, выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20105) в МАИ.

Библиографический список

1. Антипов В.В., Добрянский В.Н., Короленко В.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О. Оценка эффективных механических характеристик слоистого алюмокомпозита в условиях одноосного растяжения // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 221-229.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. № 8(884). С. 86-91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13
3. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. № 10. С. 5-19.
4. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016.

- № 3(42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7-17.
6. ГОСТ Р 57745-2017 Композиты полимерные. Определение предела прочности при межслойном сдвиге ламинатов методом короткой балки. – М.: Стандартинформ, 2017. – 14 с.
7. ASTM D2344 – Short-beam strength testing of polymer matrix composite materials (interlaminar shear), http://www.trl.com/astm_d2344_short_beam_strength_testing_of_polymer_matrix_composite_materials_interlaminar_shear/
8. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures. – 4th Edition. – Elsevier, 2018. – 864 p.
9. Jones R.M. Mechanics of composite materials. – CRC press, 2014. – 538 p.
10. Kachanov L. Delamination buckling of composite materials. – Springer Science & Business Media, 2012. – 106 p.
11. Remmers J.J.C., De Borst R. Delamination buckling of fibre–metal laminates // Composites Science and Technology. 2001. Vol. 61. No. 15, pp. 2207-2213. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00114-2
12. Lin Y., Liu C., Li H., Jin K., Tao J. Interlaminar failure behavior of GLARE laminates under double beam five-point-bending load // Composite Structures. 2018. Vol. 201, pp. 79–85. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.06.037
13. Hinz S., Heidemann J., Schulte K. Damage evaluation of GLARE®4B under interlaminar shear loading at different temperature conditions // Advanced Composites Letters. 2005. Vol. 14. No. 2, pp. 47–55.
14. Lin Y., Huang Y., Huang T., Liao B., Zhang D., Li C. Characterization of progressive damage behaviour and failure mechanisms of carbon fibre reinforced aluminium laminates under three-point bending // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 135, pp. 494–506. DOI: 10.1016/j.tws.2018.12.002
15. Hinz S., Omoori T., Hojo M., Schulte K. Damage characterisation of fibre metal laminates under interlaminar shear load // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. Vol. 40. No. 6–7, pp. 925–931. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.020
16. Li H., Xu Y., Hua X., Liu C., Tao J. Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences // Composite Structures. 2018. Vol. 187, pp. 354–363. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.068
17. Jakubczak P., Bienias J., Surowska B. Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles // Composite Structures. 2018. Vol. 206, pp. 876–887. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.001
18. Xie M., Adams D.F. Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials // Composites. 1995. Vol. 26. No. 9, pp. 653–659. DOI: 10.1016/0010-4361(95)98914-7

19. *Abali F., Pora A., Shivakumar K.* Modified short beam shear test for measurement of interlaminar shear strength of composites // *Journal of Composite Materials*. 2003. DOI: 10.1177/0021998303037005053
20. *Wisnom M.R.* The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy // *Composite Structures*. 1991. Vol. 18. No. 1, pp. 47–63. DOI: 10.1016/0263-8223(91)90013-0
21. *Li M., Matsuyama R., Sakai M.* Interlaminar shear strength of C/C-composites: the dependence on test methods // *Carbon*. 1999. Vol. 37. No. 11, pp. 1749–1757. DOI: 10.1016/S0008-6223(99)00049-4
22. *Полилов А.Н., Татусь Н.А.* Энергетические критерии расслоения полимерных волокнистых композитов (ПКМ) // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2012. №3. С. 176–203.
23. *Тимошенко С.* Сопротивление материалов. – М.: Рипол Классик, 2013. – 363 с.
24. *Lurie S., Solyaev Y.* Revisiting bending theories of elastic gradient beams // *International Journal of Engineering Science*. 2018. Vol. 126, pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.01.002
25. *Лурье С.А., Ломакин Е.В., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О.* Полуобратное решение задачи чистого изгиба балки в градиентной теории упругости: отсутствие масштабных эффектов // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 479. № 4. С. 390–394. DOI: 10.7868/S0869565218100079

SIAL INTERLAMINAR STRENGTH ESTIMATION BASED ON THE RESULTS OF THE SAMPLES' THREE-POINT BENDING TESTS

Antipov V.V.^{1*}, Prokudin O.A.^{2}, Lur'e C.A.^{2-3***},
Serebrennikova N.Yu.^{1****}, Solyaev Yu.O.^{2-3*****}, Konovalov A.N.^{1*****}**

¹ *All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,
State Research Center of the Russian Federation,
VIAM, 17, Radio str., Moscow, 105005, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

³ *Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Science,
IPRIM RAS, 7, Leningradsky prospect, Moscow, 125040, Russia*

* *e-mail: antipovvv@viam.ru*

** *e-mail: Prokudin_7713@mail.ru*

*** *e-mail: salurie@mail.ru*

**** *e-mail: serebrennikova-viam@mail.ru*

***** *e-mail: yos@iam.ras.ru*

***** *e-mail: konovalov_job@list.ru*

Abstract

Laminated aluminum-glass plastics (GLARE, SIAL) are promising structural materials for application while aircraft structural elements manufacturing. These composite materials represent layered panels formed by thin layers of fiberglass and aluminum alloy. Compared with metals, SIALs possess increased specific strength, long-term strength and fire resistance. Studying the dependence of SIALs mechanical properties on the parameters of their reinforcement is an important task, which solution is necessary for the structures' design and strength computation. One of the important characteristic, determining the SIALs structural properties, as well as the other composite materials, is interlaminar strength.

The samples testing on the three-point bending by the “short beam” technique is one of the simplest techniques for determining the interlayer strength of composite materials. This method is widely used in composite structures research and development, since it does not require the application of complex experimental equipment and strain gauges. At the same time, the interlayer strength is an important parameter from the designing viewpoint, as it is used in formulating the strength criteria of composite materials. The interlaminar cracks occurrence may lead to a decrease in the bearing capacity of structural elements, and further to their destruction, for example, by the local buckling mechanism.

However, such a simple method as testing on three-point bending holds certain disadvantages associated primarily with the fact that during such tests a complicated stress state is realized in the samples, that is, not only the interlaminar shear stresses occur, but the also tensile / compressive stresses arise as well, leading to errors in determining the materials characteristics. Besides the above mentioned errors associated with non-uniform tensed-state of the samples, the complexity, occurring while samples testing on the interlaminar shear, consists in the fact that the interlaminar strength being determined while testing proves to be not a constant of the material, but it depends on the distance between the supports. This problem is known both for conventional composite materials and for metal-polymer composites. It is explained by a decrease in the tangential stresses actually acting in short samples (according to the standards the samples relative elongation should be of 5 to 10), compared to the classic beams models. These models assume the constant value of the shearing force, and, correspondingly, constant values of tangential forces (up to sign) along the sample length. Thus, application of the traditional relation for estimating transversal shear stresses acting in a beam, according to the formula $3P / (4bh)$, leads to the increase in the apparent interlayer strength of the material. Besides, the sample length impact on the results of the tests on the interlaminar strength is explained by:

- 1) Stress concentration nearby the supports;
- 2) Statistical dependence of strength on the sample size;
- 3) The interlaminar cracks occurrence not on the neutral axis of the sample and
- 4) Special dependence of interlayer strength on the parameters of fracture mechanics.

The article proposes a scheme for SIAL testing on the interlaminar shear strength by the short beam technique. These tests employ the samples with the large number of layers and unidirectional reinforcement scheme, which allows reduce the error of experiments while employing the standard equipment. The samples apparent interlaminar strength, depending on the distance between the supports, was determined by the results of the tests. Based on the calculations, the accordance of the obtained experimental data and theoretical estimates is demonstrated. The calculated SIAL interlayer strength value was of ~ 60 MPa, which corresponds to the typical interlayer strength of polymer composites. However, while testing the destruction was being realized at the contact boundary of metal and

composite layers, which allows affirm that the found interlayer strength value is a characteristic of the metal / composite contact.

Keywords: GLARE, three-point bending, short beam, interlaminar strength.

References

1. Antipov V.V., Dobryansky V.N., Korolenko V.A., Lur'e S.A., Serebrennikova N.Yu., Solyaev Yu.O. Evaluation of layered aluminum-fiberglass plastic effective mechanical characteristics in conditions of uniaxial tensile. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 221-229.
2. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8(884), pp. 86-91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13
3. Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.R., Limonin M.V. *Perspektivnye materialy*, 2016, no. 10, pp. 5-19.
4. Serebrennikova N.Yu., Antipov V.V., Senatorova O.G., Erasov V.S., Kashirin V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2016, no. 3(42), pp. 3-8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8
5. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7-17.
6. *Kompozity polimernye. Opredelenie predela prochnosti pri mezhslainom sdvige laminatov metodom korotkoi balki. GOST R 57745-2017* (Polymer Composites. Determination of strength at interlaminar shear of laminates using the short beam method. State Standard R 57745-2017), Moscow, Standartinform, 2017, 14 p.
7. *ASTM D2344 – Short-beam strength testing of polymer matrix composite materials (interlaminar shear)*, http://www.trl.com/astm_d2344_short_beam_strength_testing_of_polymer_matrix_composite_materials_interlaminar_shear/
8. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4th Edition. Elsevier, 2018, 864 p.
9. Jones R.M. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2014, 538 p.
10. Kachanov L. *Delamination buckling of composite materials*. Springer Science & Business Media, 2012, 106 p.
11. Remmers J.J.C., De Borst R. Delamination buckling of fibre-metal laminates. *Composites Science and Technology*, 2001, vol. 61, no. 15, pp. 2207-2213. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00114-2
12. Lin Y., Liu C., Li H., Jin K., Tao J. Interlaminar failure behavior of GLARE laminates under double beam five-point-bending load. *Composite Structures*, 2018, vol. 201, pp. 79-85. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2018.06.037
13. Hinz S., Heidemann J., Schulte K. Damage evaluation of GLARE®4B under interlaminar shear loading at different temperature conditions. *Advanced Composites Letters*, 2005, vol. 14, no. 2, pp. 47-55.

14. Lin Y., Huang Y., Huang T., Liao B., Zhang D., Li C. Characterization of progressive damage behaviour and failure mechanisms of carbon fiber reinforced aluminum laminates under three-point bending. *Thin-Walled Structures*, 2019, vol. 135, pp. 494–506. DOI: 10.1016/j.tws.2018.12.002
15. Hinz S., Omoori T., Hojo M., Schulte K. Damage characterisation of fibre metal laminates under interlaminar shear load. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40, no. 6–7, pp. 925–931. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.020
16. Li H., Xu Y., Hua X., Liu C., Tao J. Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences. *Composite Structures*, 2018, vol. 187, pp. 354–363. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.068
17. Jakubczak P., Bienias J., Surowska B. Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 876–887. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.001
18. Xie M., Adams D.F. Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials. *Composites*, 1995, vol. 26, no. 9, pp. 653–659. DOI: 10.1016/0010-4361(95)98914-7
19. Abali F., Pora A., Shivakumar K. Modified short beam shear test for measurement of interlaminar shear strength of composites. *Journal of Composite Materials*, 2003. DOI: 10.1177/0021998303037005053
20. Wisnom M.R. The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy. *Composite Structures*, 1991, vol. 18, no. 1, pp. 47–63. DOI: 10.1016/0263-8223(91)90013-O
21. Li M., Matsuyama R., Sakai M. Interlaminar shear strength of C/C-composites: the dependence on test methods. *Carbon*, 1999, vol. 37, no. 11, pp. 1749–1757. DOI: 10.1016/S0008-6223(99)00049-4
22. Polilov A.N., Tatus' N.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 3, pp. 176–203.
23. Timoshenko S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials), Moscow, Ripol Klassik, 2013, 363 p.
24. Lur'e S., Solyaev Y. Revisiting bending theories of elastic gradient beams. *International Journal of Engineering Science*, 2018, vol. 126, pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.01.002
25. Lur'e S.A., Lomakin E.V., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O. *Doklady Akademii nauk*, 2018, vol. 479, no. 4, pp. 390–394. DOI: 10.7868/S0869565218100079

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 9.04.19. Подписано в печать 6.06.19.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 27,67. Уч.-изд. л. 29,75. Тираж 150 экз. Заказ 1006/712.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993