

УДК 539.3

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА, СОДЕРЖАЩЕГО МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИ

Е. В. Карпов, А. Г. Демешкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: evkarpov@mail.ru, agdemeshkin@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования деформирования и разрушения плоских образцов из стеклотекстолита и текстолита, в которых имеются поверхностные и внутренние алюминиевые слои. Показано, что при наличии таких слоев прочность стеклотекстолита при статическом и малоцикловом нагружении уменьшается. Это обусловлено тем, что при растяжении гибридного композита вдоль слоев образуются локализованные области растяжения стеклотекстолита поперек слоев. В результате происходит расслоение как гибридного композита, так и его стеклотекстолитовой составляющей.

Ключевые слова: слоистый композит, гибридный композит, текстолит, стеклотекстолит, разрушение, многократное нагружение.

DOI: 10.15372/PMTF20180417

Введение. Полимерные композиционные материалы, содержащие в качестве наполнителя высокопрочные волокна (стеклянные, углеродные, базальтовые и др.), широко применяются в промышленности, поскольку обладают высокой статической удельной прочностью, коррозионной стойкостью, трещиностойкостью, имеют большой модуль Юнга и малый коэффициент теплового расширения. В последнее время разрабатываются многослойные гибридные композиты, состоящие из слоев алюминия толщиной $0,3 \div 0,4$ мм и тонких прослоек стеклопластика, составляющих $30 \div 40$ % объема композита [1–4]. В зарубежной литературе материалы такого класса известны как фиброметалламинаты [5, 6]. Фиброметалламинаты (ФМЛ) имеют большую трещиностойкость, удельную прочность и пожароустойчивость по сравнению с монолитными пластинами из алюминиевых сплавов [1–4]. Значительное количество работ, обзор которых приведен в [7], посвящено исследованию разрушения ФМЛ при низкоскоростном ударном нагружении. В [8, 9] отмечается большая стойкость ФМЛ к ударному воздействию по сравнению с монолитным металлом, несмотря на то что стеклопластики, входящие в состав ФМЛ, легко разрушаются при ударном нагружении. По мнению авторов [8, 9], высокая стойкость ФМЛ к ударному воздействию обусловлена сильной зависимостью прочности стекловолокна от скорости нагружения. В [10, 11] исследуется процесс образования усталостных трещин в ФМЛ в предположении, что усталость этих композитов определяется усталостью металлических слоев. В [12] изучено влияние направления армирования препрега на прочность ФМЛ на

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00679).

© Карпов Е. В., Демешкин А. Г., 2018

основе титана при растяжении. В работе [13] проводится численное моделирование расслаивания ФМЛ при изгибе, в [14] предложен метод расчета статических механических характеристик ФМЛ на основе свойств его компонентов.

Результаты исследования ФМЛ показывают, что путем чередования большого количества тонких слоев алюминия и стеклопластика можно получать гибридные композиты с высокими конструкционными и функциональными характеристиками. Гибридный композиционный материал может быть образован также путем добавления алюминиевых слоев в многослойные пластины или оболочки из стеклопластика большой толщины для защиты их поверхностей или увеличения прочности в целом. Целью данной работы является экспериментальное исследование деформирования и разрушения полученных таким образом гибридных композитов на основе многослойных стеклотекстолитовых пластин.

1. Экспериментальные образцы и постановка экспериментов. В экспериментах на растяжение исследовались лопаточные образцы из стеклотекстолита ВПС-4, состоящего из слоев ровинговой стеклоткани с сатиновым плетением, пропитанной эпоксидным связующим. Образцы стеклотекстолита вырезались из многослойных листов вдоль нитей основы. Использовались листы, состоящие из трех и восьми слоев ткани (толщина одного слоя приблизительно равна 0,7 мм). На основе ВПС-4 изготавливались также образцы гибридного композита, состоящие из слоев алюминиевого сплава и ВПС-4. Склейка стеклотекстолита с алюминием осуществлялась с помощью эпоксидной смолы при сжатии в прессе. Толщина каждого слоя алюминиевого сплава составляла 1 мм. Лопаточные образцы были изготовлены из гибридного композита трех типов (рис. 1, 2): 1) два слоя алюминия с трехслойным ВПС-4 между ними (композит 1-3-1); 2) чередующиеся три слоя алюминия и два слоя трехслойного ВПС-4 (композит 1-3-1-3-1); 3) два слоя алюминия с восьмислойным ВПС-4 между ними (композит 1-8-1). Ширина рабочей части образца в плоскости слоев равна 11 мм, длина — 50 мм. Головки образцов, длина которых равна 55 мм, фиксировались в клиновинтовых захватах.

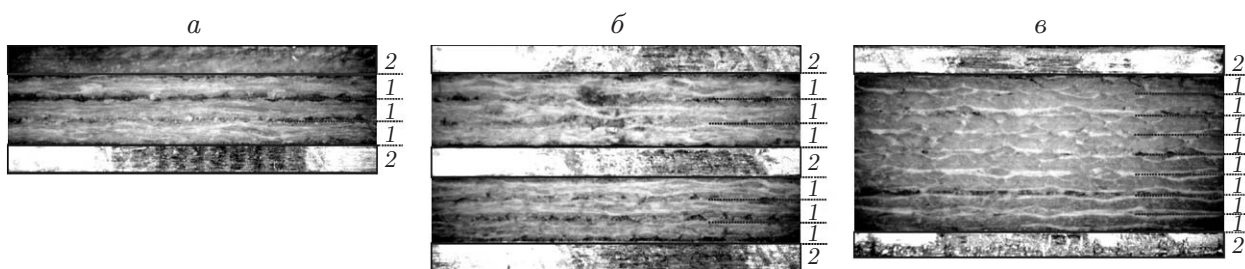


Рис. 1. Расположение слоев ВПС-4 (1) и алюминиевого сплава (2) в гибридных композитах 1-3-1 (а), 1-3-1-3-1 (б) и 1-8-1 (в)

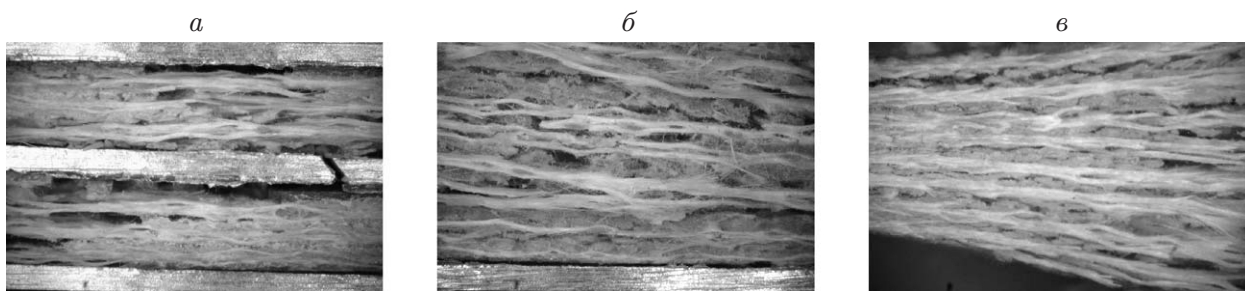


Рис. 2. Разрушение стеклотекстолита при растяжении вдоль слоев в составе гибридных композитов 1-3-1-3-1 (а), 1-8-1 (б) и в чистом виде (в)

Испытания проводились на электромеханической универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 в режимах квазистатического и малоциклового растяжения вдоль слоев. Деформации образцов измерялись внешним экстензометром, в отдельных случаях с помощью системы корреляционного анализа изображений Vic3D определялись поля деформаций на боковой поверхности образцов.

Для проведения испытаний, в которых определялись поля деформаций на боковой поверхности растягиваемых образцов, были изготовлены образцы композитов с увеличенной толщиной: 1-16-1 и 1-8-1-8-1. Увеличение толщины обусловлено тем, что используемый метод корреляции изображений не позволяет получить поля деформаций в непосредственной близости от краев исследуемой области, поэтому исследование боковых поверхностей тонких образцов существенно затруднено.

2. Квазистатическое растяжение. На рис. 3 приведены диаграммы нагружения образцов из гибридного композита и его компонентов.

До момента разрушения исходный композит ВПС-4 деформируется линейно, а гибридные композиты имеют предел упругости, при превышении которого на диаграмме нагружения появляется участок неупругого деформирования. Поскольку переход от упругого деформирования к неупругому слабо выражен, предел упругости и предел текучести алюминиевого сплава определялись при остаточной деформации, равной 0,2 % (далее эти величины обозначены одинаково: $\sigma_{0,2}$). В таблице приведены значения $\sigma_{0,2}$ для всех рассмотренных материалов, на диаграммах нагружения которых имеется участок неупругого деформирования, а также значения максимального растягивающего напряжения σ_{lim} и предельного относительного удлинения ε_{lim} . Для определения приведенных характеристик использовалось по три образца из каждого материала. Для гибридных композитов указано также отношение суммарной толщины стеклотекстолитовых слоев $H_{ст}$ к суммарной толщине алюминиевых слоев H_{Al} . Прочность ВПС-4 из восьми слоев ткани больше прочности ВПС-4 из трех слоев, а разброс экспериментальных значений прочности меньше. Это объясняется уменьшением относительного размера структурных дефектов при увеличении числа слоев композита.

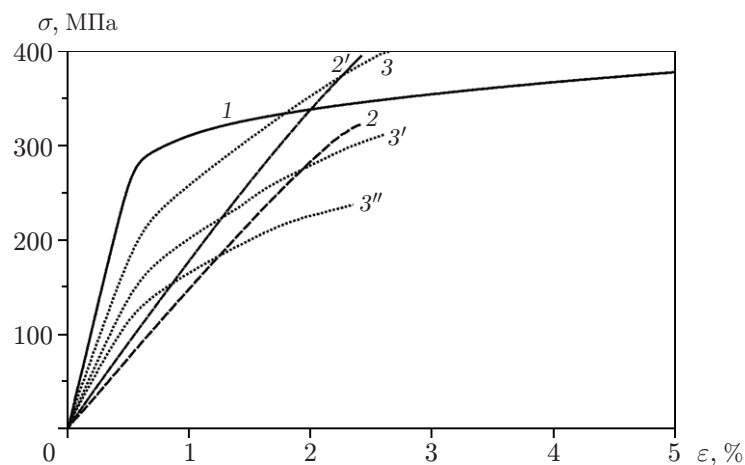


Рис. 3. Зависимость среднего относительного удлинения от среднего условного напряжения при квазистатическом растяжении:

1 — алюминиевый сплав, 2 — трехслойный ВПС-4, 2' — восьмислойный ВПС-4, 3 — гибридный композит 1-3-1, 3' — гибридный композит 1-3-1-3-1, 3'' — гибридный композит 1-8-1

Механические характеристики экспериментальных образцов

Материал образца	$H_{ст}/H_{Al}$	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{lim} , МПа	ε_{lim} , %
Алюминиевый сплав	—	$300,0 \pm 1,0$	$427,0 \pm 6,0$	$19,00 \pm 1,00$
ВПС-4 (3 слоя)	—	—	$320,0 \pm 18,0$	$2,40 \pm 0,10$
ВПС-4 (8 слоев)	—	—	$390,0 \pm 15,0$	$2,40 \pm 0,10$
Композит 1-3-1	1,05	$245,0 \pm 2,0$	$400,0 \pm 7,5$	$2,70 \pm 0,05$
Композит 1-3-1-3-1	1,40	$189,0 \pm 5,5$	$312,0 \pm 10,5$	$2,70 \pm 0,05$
Композит 1-8-1	2,80	$156,0 \pm 3,0$	$237,0 \pm 16,5$	$2,40 \pm 0,05$

Добавление алюминиевых слоев в композиты либо не оказывает влияния на величину ε_{lim} (при $H_{ст}/H_{Al} = 2,8$), либо приводит к ее увеличению на 10 % (при $H_{ст}/H_{Al} \leq 2,8$), в то время как влияние дополнительных слоев на прочность является более существенным и зависит от соотношения объемных долей компонентов.

Прочность гибридного композита 1-3-1, в котором соотношение объемных долей компонентов близко к единице, больше прочности его основы (трехслойного ВПС-4). По мере увеличения объемной доли стеклотекстолита в гибридном композите прочность композита и предел упругости уменьшаются. Если прочность композита 1-3-1-3-1 равна прочности входящего в его состав стеклотекстолита, то значение σ_{lim} для композита 1-8-1 составляет лишь 60 % значения σ_{lim} для стеклотекстолита, на основе которого он изготовлен, и 79 % значения $\sigma_{0,2}$ для алюминиевого сплава. Увеличение площади поперечного сечения за счет добавления более прочных металлических слоев приводит не к увеличению, а к уменьшению предельной растягивающей силы приблизительно на 20 %.

3. Малоцикловое растяжение. Как отмечено выше, прочность гибридного композита 1-3-1 оказалась больше прочности исходного стеклотекстолита, однако в отличие от него большая часть общей деформации композита до разрушения является необратимой деформацией. Это означает, что при амплитуде нагружения, превышающей предел упругости гибридного композита, в случае периодического нагружения должно происходить накопление повреждений, так же как при малоцикловом нагружении упругопластических материалов с амплитудой нагрузки, превышающей предел текучести.

Проведен ряд экспериментов, в которых сравнивалось поведение исходного ВПС-4 и гибридного композита на его основе при одной и той же амплитуде нагружения. Периодическое нагружение представляло собой растяжение с минимальной нагрузкой в цикле $\sigma_{min} = 20$ МПа и максимальной нагрузкой $\sigma_{max} = 200$ МПа.

Испытывались образцы из восьмислойного стеклотекстолита ВПС-4 и гибридного композита 1-8-1 на его основе (рис. 4). Верхний предел периодической нагрузки $\sigma_{max} = 200$ МПа значительно меньше предела прочности обоих компонентов гибридного композита и предела текучести алюминиевого сплава, входящего в состав композита 1-8-1, но больше условного предела упругости $\sigma_{0,2}$ гибридного композита.

При циклическом нагружении ВПС-4 скорость увеличения относительного удлинения быстро стабилизируется и становится близкой к нулю. При нагружении гибридного композита наблюдаются непрерывное увеличение относительного удлинения и периодически возникающие интервалы нагружения, на которых происходит ускоренное приращение удлинения, что свидетельствует об образовании крупных дефектов. Таким образом, гибридный композит оказался существенно менее устойчивым к разрушению при циклическом нагружении, чем исходный стеклотекстолит.

Следует отметить, что образцы из гибридного композита, не разрушившиеся после нескольких сотен циклов нагружения в диапазоне $20 \div 200$ МПа, разрушились при последующей разгрузке под действием остаточных напряжений. Разрушение представляло собой отслоение металла от стеклотекстолита. Область отслоения распространялась от

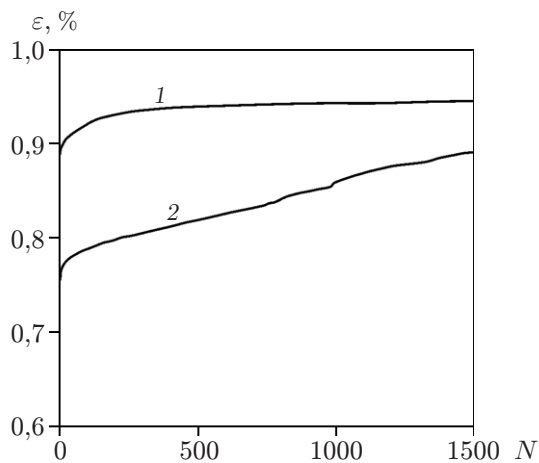


Рис. 4. Зависимость остаточного относительного растяжения ε от числа циклов нагружения N :

1 — восьмислойный стеклотекстолит ВПС-4, 2 — гибридный композит 1-8-1

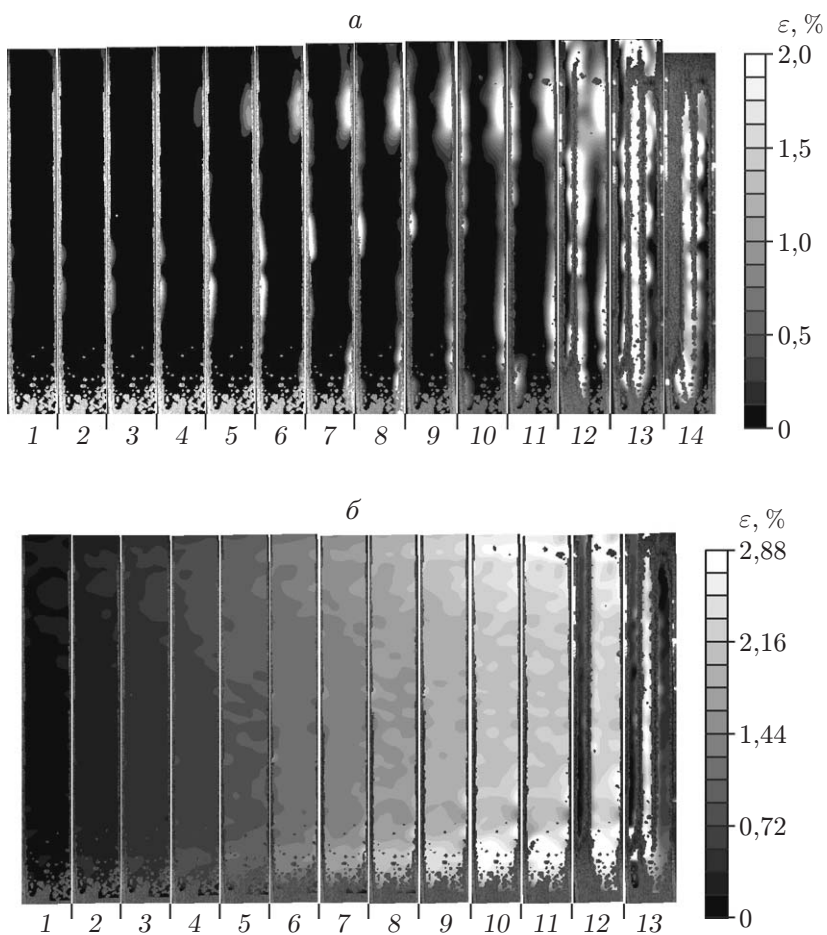


Рис. 5. Поля деформаций на боковой поверхности образца из гибридного композита 1-16-1:

a — деформация растяжения в направлении нормали, *б* — деформация вдоль слоев; 1-14 — номера фотографий

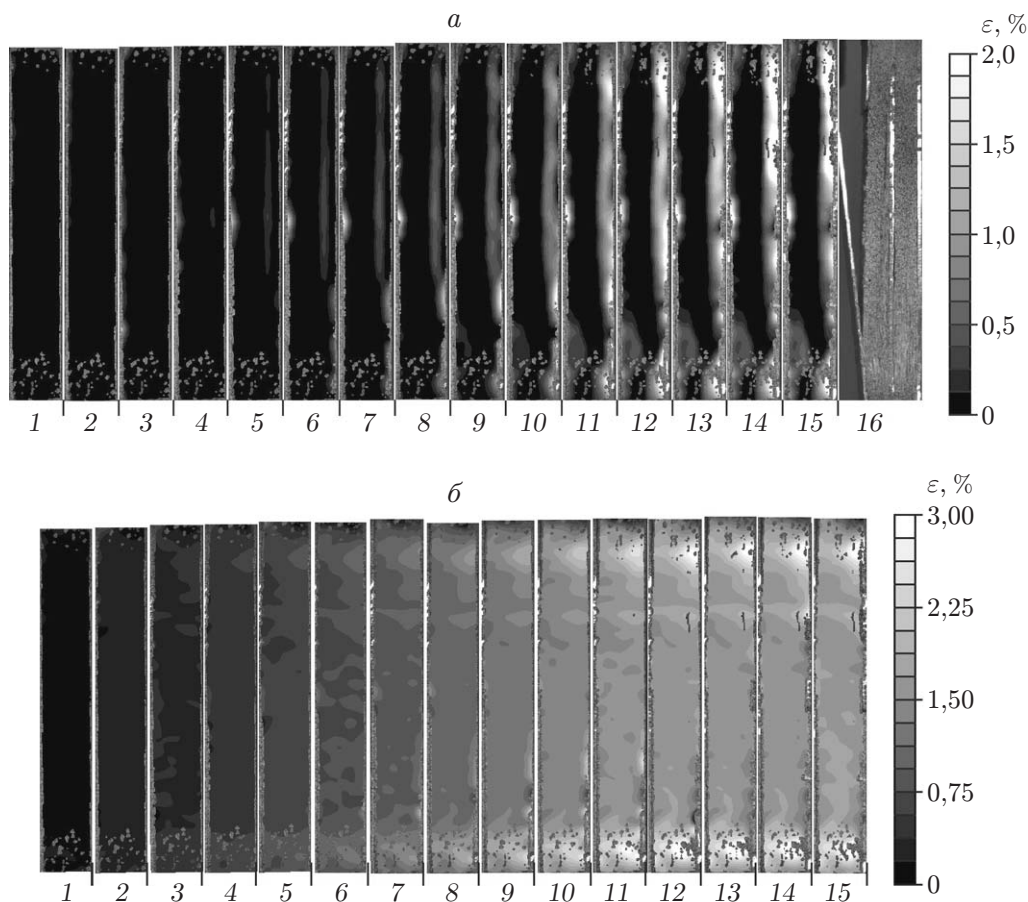


Рис. 6. Поля деформаций на боковой поверхности образца из гибридного композита 1-8-1-8-1:

a — деформация растяжения в направлении нормали, *б* — деформация вдоль слоев; 1–16 — номера фотографий

середины рабочей части образца по направлению к захватам, в результате чего происходило выпучивание металлических слоев.

4. Исследование полей деформаций методом корреляции изображений. Наличие предела упругости у гибридных композитов может быть вызвано переходом металлических слоев в пластическое состояние, поскольку значения относительного удлинения, соответствующие значениям $\sigma_{0,2}$ для алюминиевого сплава и гибридных композитов, очень близки. Другой причиной появления предела упругости могут быть необратимые изменения, происходящие внутри многослойного стеклотекстолита. Для их выявления проведены эксперименты по растяжению образцов. В этих экспериментах определялись поля деформаций на боковых поверхностях образцов, на которые выходят и металлические, и стеклотекстолитовые слои (рис. 5, 6). На рис. 5, 6 показаны состояния образцов из гибридных композитов 1-16-1 и 1-8-1-8-1 соответственно при их растяжении.

Обнаружено, что помимо сужения в поперечном направлении, сопровождающего растяжение в продольном направлении, в стеклотекстолитовых слоях образуются области, в которых происходит растяжение вдоль нормали к слоям композита. Поле деформаций растяжения в направлении нормали к слоям композита показано на рис. 5, *a* и рис. 6.

Сравнение кривых нагружения и полей деформаций на рис. 5, 6 показало, что достижение предела упругости происходит быстрее, чем появляются локальные отслоения металлических слоев от стеклотекстолита.

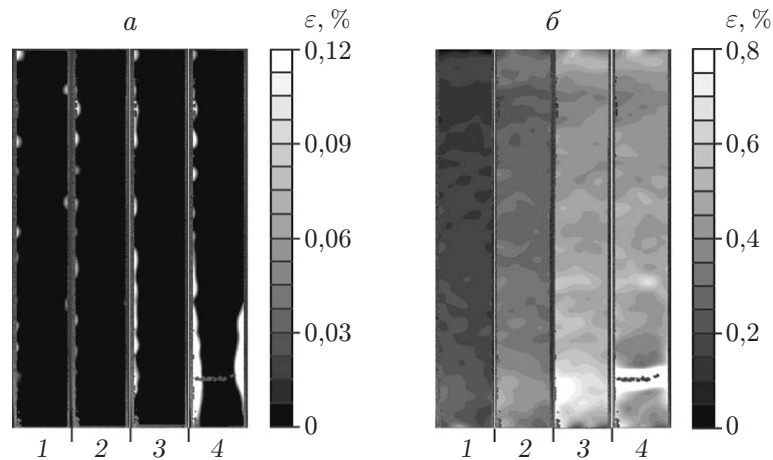


Рис. 7. Поля деформаций на боковой поверхности образца из гибридного композита на основе текстолита:

a — деформация растяжения в направлении нормали, *б* — деформация вдоль слоев; 1–4 — номера фотографий

В многослойных стеклотекстолитах рассматриваемого типа и аналогичных композитах на основе углеродных волокон разрыву при растяжении вдоль волокон предшествует расслоение, которое происходит как вдоль границ тканевых слоев, так и внутри них и сопровождается значительным расширением в поперечном направлении (см. рис. 2). Поэтому можно предположить, что необратимые деформации и уменьшение прочности гибридных композитов обусловлены активизацией процессов расслоения стеклотекстолита вследствие наличия напряженного состояния, вызванного наличием металлических слоев.

Проведены эксперименты с образцами гибридных композитов, в которых стеклотекстолит заменен текстолитом на основе хлопчатобумажной ткани, разрушающимся подобно однородным материалам с образованием одиночной магистральной трещины без расслоения. Испытания показали, что такой гибридный композит не имеет предела упругости. Поперечные растягивающие деформации на боковой поверхности образца из этого композита также имеют место (рис. 7), но они не оказывают существенного влияния на его разрушение.

Заключение. Проведенные исследования показали, что для гибридных композитов, состоящих из многослойного стеклотекстолита и тонких слоев алюминия, при объемной доле алюминия более 40 % предельное растяжение превышает предельное растяжение стеклотекстолита на 10 %, а при объемной доле алюминия, равной 50 %, прочность гибридного композита приближается к прочности алюминиевых слоев и превышает прочность исходного стеклотекстолита на 20 %. Однако при этом появляется предел упругости, значительно меньший предела прочности стеклотекстолита, т. е. гибридный композит накапливает повреждения при нагрузках, при которых стеклотекстолит деформируется упруго. При объемной доле алюминия менее 50 % предел прочности гибридного композита существенно меньше предела прочности исходного стеклотекстолита. При соотношении $H_{ст}/H_{Al} = 2,8$ механические характеристики гибридного композита хуже, чем у каждого из его компонентов.

Наблюдаемое ухудшение механических свойств гибридных композитов на основе многослойного стеклотекстолита, по-видимому, обусловлено тем, что стеклотекстолиты такого типа могут расслаиваться при растяжении вдоль слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сенаторова О. Г., Антипов В. В., Лукина Н. Ф. и др.** Высокопрочные трещиностойкие легкие слоистые алюмокомпозиты класса СИАЛ — перспективный материал для авиационных конструкций // *Технология легких сплавов*. 2009. № 2. С. 28–31.
2. **Шестов В. В., Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Нефедова Ю. Н.** Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава // *Технология легких сплавов*. 2016. № 1. С. 119–123.
3. **Фридляндер И. Н., Аниховская Л. И., Сенаторова О. Г. и др.** Трещиностойкие высокопрочные легкие слоистые композиты класса СИАЛ для ремонта обшивок планера самолета // *Авиац. материалы и технологии*. 2002. № 1. С. 35–41.
4. **Антипов В. В., Сидельников В. В., Самохвалов С. В. и др.** Возможности применения слоистого алюмокомпозита в обшивке фюзеляжа самолета // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. 2016. Т. 18, № 1-1. С. 77–82.
5. **Fibre metal laminates** / Ed. by A. Vlot, J. W. Gunnink. Rotterdam: Kluwer Acad. Publ., 2001.
6. **Beumler T.** Flying GLARE. Delft: TU Delft, 2004.
7. **Gin B. C., Periyasamy M.** Low velocity impact response of fibre-metal laminates — A review // *Composite Structures*. 2014. V. 107. P. 363–381.
8. **Vlot A.** Impact loading on fibre metal laminates // *Intern. J. Impact Engng.* 1996. V. 18, iss. 3. P. 291–307.
9. **Vlot A., Krull M.** Impact damage resistance of various fibre metal laminates // *J. Phys. IV Colloque*. 1997. V. 7. P. 1045–1050.
10. **Reyes G., Cantwell V. W. J.** The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene // *Composites Sci. Technol.* 2000. V. 60, iss. 7. P. 1085–1094.
11. **Homan J. J.** Fatigue initiation in fibre metal laminates // *Intern. J. Fatigue*. 2006. V. 28, iss. 4. P. 366–374.
12. **Cortés P., Cantwell W. J.** The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates // *Composites Sci. Technol.* 2006. V. 66, iss. 13. P. 2306–2316.
13. **Remmers J. J. C., de Borst R.** Delamination buckling of fibre-metal laminates // *Composites Sci. Technol.* 2001. V. 61, iss. 15. P. 2207–2213.
14. **Hagenbeek M., Van Hengel C., Bosker O. J., Vermeeren C. A. J. R.** Static properties of fibre metal laminates // *Appl. Composite Materials*. 2003. V. 10. P. 207–222.

*Поступила в редакцию 30/VI 2017 г.,
в окончательном варианте — 8/XI 2017 г.*
