

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.3

doi: 10.26907/2541-7746.2022.4.357-370

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ С НЕСУЩИМИ СЛОЯМИ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА [0°] ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

*С.А. Холмогоров, Н.В. Левшонкова*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, 420111, Россия*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

Предложена экспериментальная методика испытаний на сжатие трехслойных тест-образцов с тонкими несущими слоями, изготовленными из волокнистого композита. Данный способ ориентирован на испытания тонких слоев композиционного материала, тест-образцы из которых даже при весьма короткой рабочей части теряют устойчивость по изгибной форме, тем самым искажая определяемую величину разрушающих напряжений. Проведены экспериментальные исследования механизмов разрушения трехслойных тест-образцов с несущими слоями [0°] из однонаправленного волокнистого композита под действием осевого сжатия. Выявлена возможность реализации сдвиговой формы потери устойчивости для тест-образцов с различными геометрическими параметрами, что позволяет определяемые предельные напряжения, формирующиеся в несущих слоях, принять в качестве механической характеристики при расчете на прочность конструкций из композиционных материалов. Показано, что для тест-образцов с сотовым наполнителем в несущих слоях при сжатии реализуется синфазная изгибная форма потери устойчивости. Реализация неклассической сдвиговой формы потери устойчивости возможна только для тест-образцов с жестким наполнителем, в качестве которого была использована древесина породы бальса.

**Ключевые слова:** волокнистый композит, трехслойный тест-образец, трансверсально-мягкий наполнитель, осевое сжатие, сдвиговая форма потери устойчивости

### Введение

Трехслойные конструкции имеют широкое применение в судостроительной и аэрокосмической отраслях. Как правило, такие конструкции состоят из двух жестких несущих слоев, воспринимающих тангенциальные напряжения, и относительно маложесткого наполнителя, воспринимающего напряжения поперечного обжатия и поперечные касательные напряжения. Выбор материалов для несущих слоев и наполнителя зависит от специфики работы трехслойных конструкций. В аэрокосмической отрасли, как правило, применяется сотовый наполнитель на основе легких алюминиевых сплавов или полимерной бумаги. Такие наполнители обладают наиболее высокими удельными жесткостными и прочностными характеристиками при малом удельном весе. В трехслойных конструкциях, применяющихся в кораблестроении, используется пористый металлический наполнитель.

От таких заполнителей требуется высокая удельная ударная вязкость и высокая способность поглощать энергию удара. В качестве материалов для несущих слоев используются как металлы, так и композитные материалы на основе стекло- и углепластиков.

Разрушение трехслойных конструкций может быть обусловлено реализацией разных процессов деформирования их составных элементов в процессе их нагружения [1–4]: разрушение заполнителя по причине достижения предельных значений формирующихся в них поперечных касательных напряжений [5, 6], усталостные разрушения заполнителя [3, 7]; отслоение несущих слоев от заполнителя [8, 9]; достижение предельных поперечных напряжений в заполнителе [10]; потеря устойчивости несущих слоев [11, 12].

В сверхлегких трехслойных конструкциях несущие слои, как правило, изготавливаются из волокнистых композитов на основе углепластиков. Однонаправленные углепластики могут обладать даже большей прочностью при растяжении, чем высокопрочные стали. Поэтому основной причиной разрушения таких конструкций может являться потеря устойчивости несущих слоев по той или иной форме в условиях формирующихся сжимающих напряжений. В частности, при формировании таких напряжений возможна реализация поперечно-сдвиговой формы потери устойчивости. Как известно [13, 14], при сжатии в направлении волокон тест-образцов из однонаправленных волокнистых композитов за предельные сжимающие напряжения могут быть приняты значения модуля поперечного сдвига. В цикле работ [15, 16] было показано, что теоретическое выявление сдвиговой формы потери устойчивости композитных тест-образцов при трехточечном изгибе возможно при использовании уравнений, основанных на простейшей кинематической модели С.П. Тимошенко.

В соответствии с существующими отечественными и международными стандартами одним из видов испытаний тест-образцов из волокнистых композитных материалов (ВКМ) являются испытания на осевое сжатие. Для их проведения, как правило, изготавливаются плоские тест-образцы со структурами  $[0^\circ]_s$ ,  $[90^\circ]_s$  и  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  ( $s$  – число, характеризующее количество монослоев в пакете). Даже при значительном числе монослоев испытание на осевое сжатие стандартных тест-образцов сопровождается продольно-поперечным изгибом, влияющим на результаты экспериментальных исследований. Для уменьшения этого явления возможно изготавливать специальные композитные тест-образцы с трехслойной по толщине структурой, у которых внешние слои изготавливаются из ВКМ, а средний слой, называемый заполнителем, из материала, механические характеристики которого значительно ниже в сравнении с механическими характеристиками ВКМ.

Известно, что при испытаниях на сжатие стандартных тест-образцов из ВКМ, имеющих структуру  $[0^\circ]_s$ , определяемое предельное значение нормального напряжения может быть принято равным значению касательного модуля поперечного сдвига [16], при достижении которого разрушение ВКМ обусловлено реализацией в нем поперечно-сдвиговой формы потери устойчивости (ФПУ). Для выявления такой ФПУ в работе [17] была построена уточненная геометрически нелинейная теория деформирования трехслойных пластин и оболочек с трансверсально-мягким заполнителем и несущими слоями из композиционных материалов. Для несущих слоев использована уточненная сдвиговая модель С.П. Тимошенко с учетом обжатия по толщине. Для заполнителя трехмерные уравнения теории упругости были проинтегрированы по поперечной координате с учетом равенства нулю тангенциальных нормальных напряжений и введены постоянные по толщине неизвестные касательные усилия. Как показали результаты аналитического решения задачи о четырехточечном изгибе трехслойных длинных тест-образцов, построенные в [17]

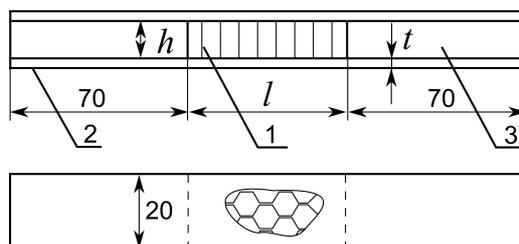


Рис. 1. Геометрические размеры тест-образцов: 1 – сотовый наполнитель; 2 – несущие слои из КМ; 3 – закладные элементы для захвата

уравнения позволяют выявить сдвиговые формы потери устойчивости, которые, как известно [18], реализуются в волокнистых композитах с  $G \ll E$  при действии напряжений сжатия.

Для верификации результатов аналитического решения, полученных в [17], в работе [19] проведены экспериментальные исследования разрушения трехслойных тест-образцов с несущими слоями из однонаправленного волокнистого композита на основе углеленты ЭЛУР-П и связующего холодного отверждения ХТ-118. В [19] показано, что при использовании в трехслойных образцах наполнителя из полимерной бумаги реализация сдвиговой формы потери устойчивости невозможна. Она реализуется только при использовании жесткого наполнителя, в качестве которого при изготовлении тест-образцов в экспериментах была применена бальса.

### 1. Тест-образцы и их изготовление

В развитие полученных в [16, 19] результатов в настоящей работе проведены экспериментальные исследования механизмов разрушения трехслойных тест-образцов с несущими слоями  $[0^\circ]$  из однонаправленного волокнистого композита под действием осевого сжатия. Основной целью работы является выявление возможности реализации сдвиговых ФПУ для тест-образцов с различными геометрическими параметрами, что позволяет определяемые предельные напряжения  $\sigma_*^-$ , формирующиеся в несущих слоях, принять в качестве механической характеристики при расчете конструкций из композиционных материалов.

Для проведения экспериментов были изготовлены четыре типа тест-образцов: I –  $l = 35$  мм,  $h = 5$  мм; II –  $l = 35$  мм,  $h = 10$  мм; III –  $l = 50$  мм,  $h = 10$  мм; IV –  $l = 50$  мм,  $h = 5$  мм с жестким наполнителем ( $l$  – длина рабочей части образца,  $h$  – толщина наполнителя (см. рис. 1)). Номинальная толщина несущих слоев  $2t$  была равна 2.00–2.40 мм, ширина  $b$  всех тест-образцов составляла 20 мм. Образцы типа I–III были изготовлены с сотовым наполнителем, а для образцов типа IV в качестве наполнителя использовалась древесина (бальса).

Несущие слои тест-образцов изготавливались методом вакуумного формования. Для этого 17 монослоев углеленты ЭЛУР-П поочередно пропитывались связующим ХТ-118, укладывались на металлическую плиту, которая накрывалась воздухонепроницаемым материалом, далее из-под него откачивался воздух. Под вакуумом заготовки для несущих слоев находились в течение 24 ч, за которые связующее полностью полимеризовалось. После этого на внутреннюю сторону одной из заготовок в соответствии с эскизом на рис. 1 укладывался сотовый наполнитель и закладные детали из стеклотекстолита, сверху укладывалась вторая заготовка. Все детали вместе склеивались предварительно нанесенным связующим. После изготовления трехслойной панели из нее алмазным диском нарезались тест-образцы.

Для приложения сжимающей осевой нагрузки использовалось приспособление, описанное в стандарте испытаний на сжатие ASTM D3410. Оно включает в себя

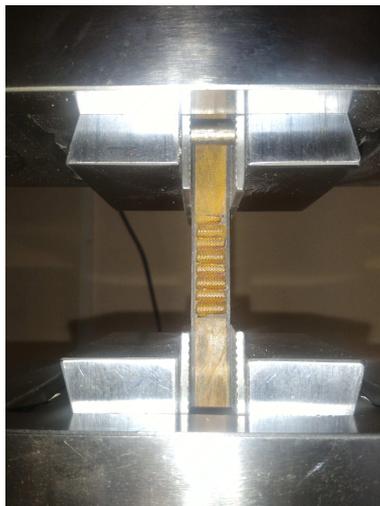


Рис. 2. Вид тест-образца в испытательной оснастке

верхний и нижний клиновые захваты, которые соединены между собой жесткими направляющими. Сжимающее усилие передавалось на образец посредством приложения касательных усилий к захватной части образца вследствие самозажатия клиновых захватов.

Для контролирования того, что в несущих слоях формируются равные по величине деформации, на рабочую часть каждого несущего слоя наклеивались тензорезисторы ВЕ 120-5АА с базой 10 мм, а их показания обрабатывались тензометрической станцией NI PXI-1052 (National Instruments, США). В ходе эксперимента образцы нагружались на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5884 (Instron, США) кинематическим способом до разрушения со скоростью 2 мм/мин, при этом фиксировались нагрузка и показания деформаций с каждого из двух наклеенных на тест-образец тензорезисторов.

## 2. Экспериментальные результаты

На рис. 2 можно видеть трехслойный тест-образец типа II, установленный в испытательную оснастку.

**2.1. Тест-образцы с  $l = 35$  мм,  $h = 5$  мм.** В табл. 1 приведены результаты испытаний четырех тест-образцов типа I с толщиной сотового заполнителя  $h = 5$  мм. Среднее сжимающее напряжение при сжатии  $\sigma_*^-$  оказалось равным  $\langle \sigma_*^- \rangle = 290$  МПа.

На рис. 3 приведены диаграммы деформирования обоих несущих слоев образца № 4, полученные с помощью тензорезисторов. Видно, что диаграммы можно считать линейными вплоть до разрушающих деформаций  $\varepsilon \approx 2000 \mu$ . На диаграммах можно точно отметить момент начала разрушения несущих слоев, характеризующийся резким ростом разности деформаций при напряжении  $\sigma^- = 290$  МПа. Несмотря на то что разрушающие напряжения для образца № 4 оказались равными  $\sigma_*^- = 345$  МПа, диаграммы обрываются на значении  $\sigma^- = 290$  МПа, так как в этот момент произошло разрушение тензорезисторов и показания деформаций являются некорректными. На рис. 4 показан график разности деформаций несущих слоев, значения которых вычислены по формуле  $\varepsilon_i^b = (\varepsilon_i^{(1)} - \varepsilon_i^{(2)}) / (\varepsilon_i^{(1)} + \varepsilon_i^{(2)})$ .

Табл. 1

Результаты испытаний тест-образцов,  $l = 35$  мм,  $h = 5$  мм

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Предельные напряжения при сжатии, МПа
1	20.00	2.30	11.034	239.869
2	20.00	2.30	11.814	256.828
3	20.00	2.30	14.689	319.239
4	20.00	2.30	15.876	345.136
Среднее	20.00	2.30	13.353	290.291

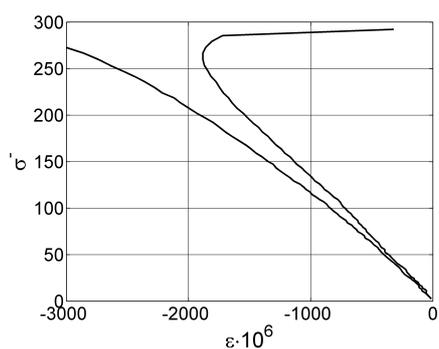
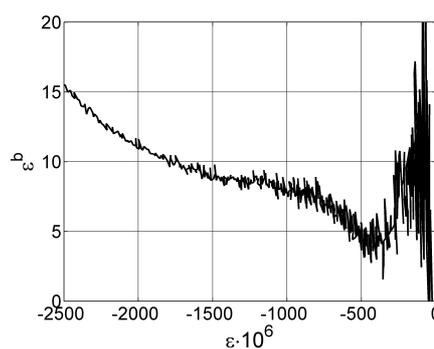
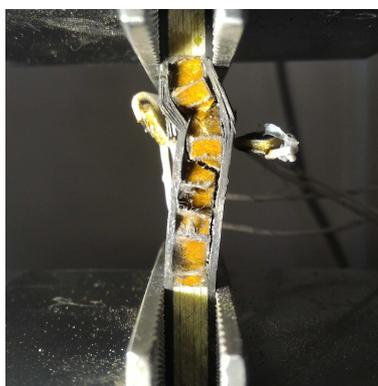
Рис. 3. Диаграмма деформирования двух несущих слоев для образца № 4,  $l = 35$  мм,  $h = 5$  мм (МПа)

Рис. 4. Разность деформаций несущих слоев для образца № 4 (%)

Рис. 5. Картина разрушения тест-образца № 4,  $l = 35$  мм,  $h = 5$  мм

Заметим, что в диапазоне  $\varepsilon = 1000\text{--}2000 \mu$  разность деформаций составляет 5–10%. Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что в несущих слоях до разрушения формируются практически одинаковые (с указанной степенью точности) по величине осевые деформации.

Из анализа картины разрушения (рис. 5) можно сделать вывод о том, что оба несущих слоя сохранили прямолинейность, а потеря несущей способности произошла вследствие потери устойчивости несущего слоя по сдвиговой форме. Зону сдвига можно хорошо наблюдать в верхней части рабочей длины образца. Об отсутствии изгиба также говорят диаграммы деформирования (рис. 3), на которых отсутствует разница в деформациях перед разрушением.

Табл. 2

Результаты испытаний тест-образцов,  $l = 35$  мм,  $h = 10$  мм

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Предельные напряжения при сжатии, МПа
1	20.00	2.40	17.130	356.875
2	20.00	2.40	15.589	324.771
3	20.00	2.40	11.264	234.667
4	20.00	2.40	14.046	292.625
Среднее	20.00	2.40	14.507	302.234

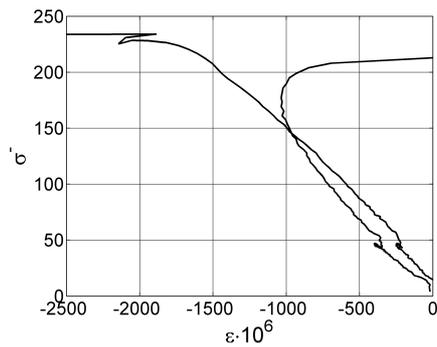
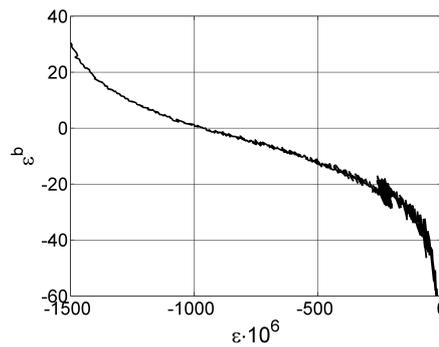
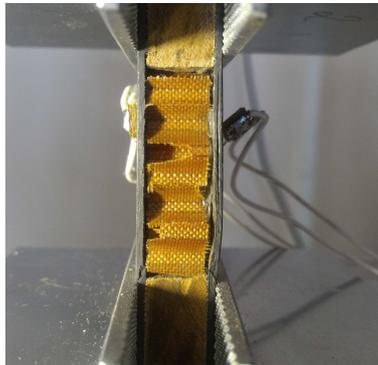
Рис. 6. Диаграмма деформирования двух несущих слоев для образца № 3,  $l = 35$  мм,  $h = 10$  мм (МПа)

Рис. 7. Разность деформаций несущих слоев для образца № 3 (%)

Рис. 8. Картина разрушения тест-образца № 3,  $l = 35$  мм,  $h = 10$  мм

**2.2. Тест-образцы с  $l = 35$  мм,  $h = 10$  мм.** Табл. 2 содержит результаты испытаний четырех трехслойных тест-образцов. Осредненное по четырем образцам значение разрушающего напряжения оказалось равным  $\langle \sigma_*^- \rangle = 302$  МПа и оно с хорошей степенью точности согласуется со значением для образцов типа I.

Диаграммы на рис. 6 характеризуют деформирование образца № 3 из табл. 2. Характер диаграмм также идентичен диаграммам на рис. 3 для образца № 4: при достижении разрушающего напряжения происходит резкий рост величины  $\varepsilon_b^b$  с почти нулевого значения до 30%, что можно наблюдать на зависимости рис. 7.

Визуальный анализ картины разрушения на рис. 8 показывает, что один из несущих слоев разрушен в нижней части в зоне перехода от захвата к рабочей части, а правый слой имеет расслоение. В нижней части рабочей зоны на правом несущем

Табл. 3

Результаты испытаний тест-образцов,  $l = 50$  мм,  $h = 10$  мм

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Пределные напряжения при сжатии, МПа
1	20.00	2.00	3.529	77.234
2	20.00	2.00	7.440	186.000
Среднее	20.00	2.00	5.485	<b>137.117</b>

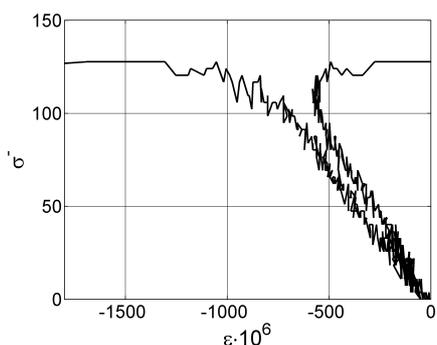


Рис. 9. Диаграмма деформирования двух несущих слоев для образца № 2,  $l = 50$  мм,  $h = 10$  мм (МПа)

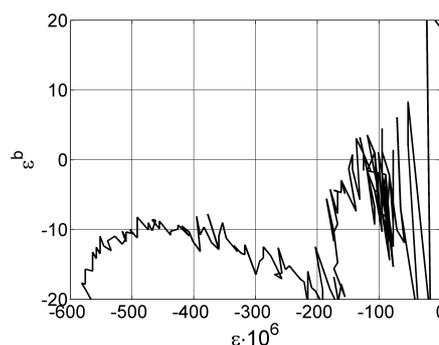


Рис. 10. Разность деформаций несущих слоев для образца № 2 (%)

слое можно заметить зону сдвига, образование которой, по-видимому, и явилось инициатором разрушения.

**2.3. Тест-образцы с  $l = 50$  мм,  $h = 10$  мм.** С удлиненной рабочей частью были испытаны два тест-образца, результаты представлены в табл. 3. Осредненное значение критических предельных сжимающих напряжений  $\langle \sigma_*^- \rangle = 137$  МПа получилось значительно меньше, чем для образцов типов I и II.

Объяснение этому можно получить, анализируя диаграммы деформирования образца № 2 на рис. 9: предельные деформации при разрушении достигают значения  $\varepsilon \approx 700 \mu$ , что намного меньше, чем для образцов типов I и II, изгибные деформации на протяжении всего процесса деформирования до момента разрушения составляют около 10% (рис. 10). Визуальный анализ картины деформирования на рис. 11 показывает, что рабочая часть теряет устойчивость по изгибной синфазной форме с образованием одной полуволны.

**2.4. Тест-образцы с жестким наполнителем и  $l = 50$  мм,  $h = 5$  мм.** В дополнение к образцам типа III с удлиненной рабочей частью были проведены испытания тест-образцов типа IV с толщиной жесткого наполнителя  $h = 5$  мм, в качестве которого использовалась древесина породы бальса. Результаты испытаний представлены в табл. 4. Следует отметить, что осредненное по двум образцам предельное напряжение  $\langle \sigma_*^- \rangle$  получилось равным  $\langle \sigma_*^- \rangle = 417$  МПа, что значительно выше предельных напряжений для предыдущих трех типов образцов.

На рис. 12 можно видеть, что диаграммы деформирования являются практически линейными. Потеря несущей способности в этом случае происходит по причине разрушения наполнителя в зоне перехода захватной части к рабочей, так как древесину уже нельзя считать трансверсально-мягким наполнителем. Из рис. 12 также

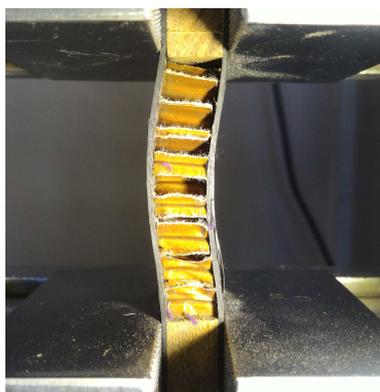
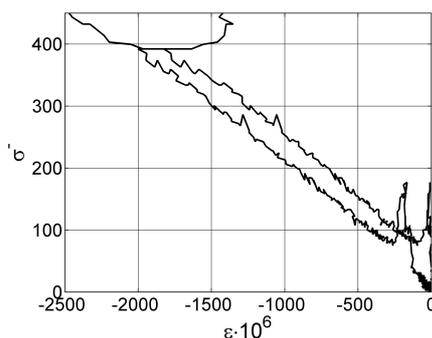
Рис. 11. Картина разрушения тест-образца № 2,  $l = 50$  мм,  $h = 10$  мм

Табл. 4

Результаты испытаний тест-образцов с жестким наполнителем,  $l = 50$  мм,  $h = 5$  мм

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Предельные напряжения при сжатии, МПа
1	20.00	2.00	15.684	392.105
2	20.00	2.00	17.702	442.555
Среднее	20.00	2.00	16.693	417.330

Рис. 12. Диаграмма деформирования двух несущих слоев для образца № 1 с жестким наполнителем,  $l = 50$  мм,  $h = 5$  мм (МПа)

видно, как один из слоев продолжает деформироваться линейно, в то время как наполнитель и второй несущий слой разрушились.

### Заключение

Композитные элементы узлов и агрегатов аэрокосмической техники в зависимости от назначения могут изготавливаться толщиной от 0.5 до 20–30 мм. Так, например, толщина стенки или полки лонжеронов средних или тяжелых самолетов, изготовленных из однонаправленных КМ, может достигать 30 мм, а толщина обшивки крыла легкого самолета или планера всего 0.5–1 мм. Такая разница в толщине изделий может диктовать и технологию изготовления: элементы с относительно небольшой толщиной могут быть выложены ручным способом из препрега, тогда как элементы с толщинами более 10–15 мм предпочтительнее изго-

Табл. 5

Сравнение критических напряжений для различных типов образцов

Тип образцов	$\langle \sigma_*^- \rangle$ , МПа (экспериментальные значения)	$\sigma_*^-$ , МПа (аналитическое решение)	
		$\sigma_*^{\text{син}}$	$\sigma_*^{\text{ант}} (n \rightarrow \infty)$
I	290	255	459
II	302	291	459
III	137	203	459
IV	417	459	459
Четырехточечный изгиб [3]	282	–	–

тавливать с помощью инфузии или методом инъекции. Можно предположить, что механические свойства КМ при различных методах изготовления готовых изделий могут различаться, а способы получения механических характеристик при сжатии должны охватывать все толщины.

Предложенный в работе способ ориентирован на испытания тонких слоев КМ, тест-образцы из которых даже при весьма короткой рабочей части теряют устойчивость по изгибной форме, тем самым искажая определяемую величину разрушающих напряжений.

В табл. 5 представлены сводные результаты испытаний всех четырех типов образцов, а также результаты, полученные на основе аналитического решения [5].

Предельное напряжение  $\sigma_*^{\text{син}}$  в табл. 5 соответствует синфазной ФПУ при  $n = 1$  ( $n$  – число полуволен), а  $\sigma_*^{\text{ант}}$  – поперечно-сдвиговой ФПУ при  $n \rightarrow \infty$ . Анализ результатов показывает, что для образцов типов I–III наименьшим предельным напряжениям соответствует синфазная ФПУ с  $n = 1$ , а для образцов типа IV с жестким наполнителем минимальные критические напряжения соответствуют сдвиговой ФПУ. Можно заметить, что экспериментальные значения предельных сжимающих напряжений  $\langle \sigma_*^- \rangle$  для образцов типа I–III несколько выше напряжений  $\sigma_*^{\text{син}}$ , а для образцов типа IV значения напряжения  $\langle \sigma_*^- \rangle$  наиболее близки к  $\sigma_*^{\text{ант}}$ .

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10018, изготовление образцов и проведение экспериментов) и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030, аналитическое решение).

#### Литература

1. Petras A., Sutcliffe M.P.F. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels // Compos. Struct. – 1999. – V. 44, No 4. – P. 237–252. – doi: 10.1016/S0263-8223(98)00123-8.
2. Rupp P., Elsner P., Weidenmann Kay A. Failure mode maps for four-point-bending of hybrid sandwich structures with carbon fiber reinforced plastic face sheets and aluminum foam cores manufactured by a polyurethane spraying process // J. Sandwich Struct. Mater. – 2019. – V. 21, No 8. – P. 2654–2679. – doi: 10.1177/1099636217722.
3. Shi H., Liu W., Fang H. Damage characteristics analysis of GFRP-Balsa sandwich beams under four-point fatigue bending // Composites, Part A. – 2018. – V. 109. – P. 564–577. – doi: 10.1016/j.compositesa.2018.04.005.

4. *Sokolinsky V.S., Shen H., Vaikhanski L., Nutt S.R.* Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams // *Compos. Struct.* – 2003. – V. 60, No 2. – P. 219–229. – doi: 10.1016/S0263-8223(02)00293-3.
5. *Jiang B., Li Zh., Lu F.* Failure mechanisms of sandwich beams subjected to three-point bending // *Compos. Struct.* – 2015. – V. 133. – P. 739–745. – doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.056.
6. *Fathi A., Woff-Fabris F., Altstädt V., Gätzi R.* An investigation of the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options // *J. Sandwich Struct. Mater.* – 2013. – V. 15, No 5. – P. 487–508. – doi: 10.1177/1099636213487004.
7. *Alila F., Fajoui J., Gerard R., Casari P., Kchaou M., Jacquemin F.* Viscoelastic behaviour investigation and new developed laboratory slamming test on foam core sandwich // *J. Sandwich Struct. Mater.* – 2020. – V. 22, No 6. – P. 2049–2074. – doi: 10.1177/1099636218792729.
8. *Piovár S., Kormaníková E.* Sandwich beam in four-point bending test: Experiment and numerical models // *Adv. Mater. Res.* – 2014. – V. 969. – P. 316–319. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.969.316.
9. *Russo A., Zuccarello B.* Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels // *Compos. Struct.* – 2007. – V. 81, No 4. – P. 575–586. – doi: 10.1016/j.compstruct.2006.10.007.
10. *Crupi V., Epasto G., Guglielmino E.* Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam // *Mar. Struct.* – 2013. – V. 30. – P. 74–96. – doi: 10.1016/j.marstruc.2012.11.002.
11. *Paimushin V.N., Makarov M.V., Badriev I.B., Kholmogorov S.A.* Geometrically nonlinear strain and buckling analysis of sandwich plates and shells reinforced on their edge // *Shell Structures: Theory and Applications.* – London: CRC Press, 2017. – V. 4. – P. 267–270. – doi: 10.1201/9781315166605-59.
12. *Badriev I.B., Makarov M.V., Paimushin V.N.* Solvability of physically and geometrically nonlinear problem of the theory of sandwich plates with transversally-soft core // *Russ. Math.* – 2015. – V. 59, No 10. – P. 57–60. – doi: 10.3103/S1066369X15100072.
13. *Budiansky B., Fleck N.A.* Compressive failure of fibre composites // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1993. – V. 41, No 1. – P. 183–211. – doi: 10.1016/0022-5096(93)90068-Q.
14. *Jumahat A., Soutis C., Jones F.R., Hodzic A.* Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading // *Compos. Struct.* – 2010. – V. 92, No 2. – P. 295–305. – doi: 10.1016/j.compstruct.2009.08.010.
15. *Паймушин В.Н., Тарлаковский Д.В., Холмогоров С.А.* О неклассической форме потери устойчивости и разрушении композитных тест-образцов в условиях трёхточечного изгиба // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки.* – 2016. – Т. 158, кн 3. – С. 350–375.
16. *Paimushin V.N., Kholmogorov S.A., Makarov M.V., Tarlakovskii D.V., Lukaszewicz A.* Mechanics of fiber composites: Forms of loss of stability and fracture of test specimens resulting from three-point bending tests // *Z. Angew. Math. Mech.* – 2018. – V. 99, No 1. – Art. e201800063, P. 1–25. – doi: 10.1002/zamm.201800063.
17. *Paimushin V.N., Gazizullin R.K., Polyakova N.V., Shishov M.A.* Sandwich shells with composite facings and transversally flexible core: Refined equations and buckling modes of specimens under four-point bending tests // *Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (Eds.) Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials, V. 141.* – Springer, Cham., 2021. – P. 391–411. – doi: 10.1007/978-3-030-54928-2\_29.

18. *Поллюков А.Н.* Этюды по механике композитов. – М.: Физматлит, 2015. – 320 с.
19. *Raimushin V.N., Firsov V.A., Kholmogorov S.A., Makarov M.V.* Experimental investigations of failure of sandwich specimens with composite facing layers under four-point bending conditions // Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (Eds.) Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials, V. 141. – Springer, Cham., 2021. – P. 377–390. – doi: 10.1007/978-3-030-54928-2\_28.

Поступила в редакцию  
19.09.2022

---

**Холмогоров Сергей Андреевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прочности конструкций; старший научный сотрудник НИЛ «Интеллектуальные биомиметические и природосообразные системы»

Казанский национальный исследовательский технический университет имени

А.Н. Туполева – КАИ

ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

E-mail: [hkazan@yandex.ru](mailto:hkazan@yandex.ru)

**Левшонкова Наталья Витальевна**, ведущий инженер кафедры ПиПСиК; ведущий инженер НИЛ «Интеллектуальные биомиметические и природосообразные системы»

Казанский национальный исследовательский технический университет имени

А.Н. Туполева – КАИ

ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

E-mail: [chydo.n@mail.ru](mailto:chydo.n@mail.ru)

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2022.4.357-370

**Experimental Research of the Failure Mechanisms  
of Sandwich Specimens with Facing Layers from Unidirectional  
Fiber-Reinforced Plastic with  $[0^\circ]$  Lay-Up  
under Axial Compression**

*S.A. Kholmogorov\**, *N.V. Levshonkova\*\**

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111 Russia*

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: \**hkazan@yandex.ru*, \*\**chydo.n@mail.ru*

Received September 19, 2022

**Abstract**

An experimental technique was developed for the compression testing of sandwich specimens with thin fiber-reinforced composite facing layers. It assumes that thin layers of a composite material are tested, and their specimens, even with a very short gage length, become unstable, thereby distorting the ultimate stress value. Here, we discuss the results of our experimental studies of the failure mechanisms of sandwich specimens with facing layers having  $[0^\circ]$  lay-up under axial compression. It was revealed that the shear buckling mode is possible in specimens with different geometrical parameters so that the ultimate stress formed in the facing layers can be taken as a mechanical characteristic when calculating the strength of composite structures. It was shown that an in-phase flexural buckling mode occurs under compression of specimens having a honeycomb core in their facing layers. A non-classical shear buckling mode is only possible in specimens with a rigid balsa core.

**Keywords:** fiber-reinforced composite, sandwich specimen, transversely flexible core, axial compression, shear buckling mode

**Acknowledgments.** This study was funded by the Russian Science Foundation (project no. 19-79-10018, manufacturing samples and carrying out experiments) and supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030, analytical solution).

**Figure Captions**

Fig. 1. Geometrical parameters of specimens: 1 – honeycomb core; 2 – FRP facing layers; 3 – embedded elements for the clamp.

Fig. 2. Sandwich specimen in the test fixture.

Fig. 3. Stress-strain diagram of two facing layers of specimen no. 4,  $l = 35$  mm,  $h = 5$  mm (MPa).

Fig. 4. Strain difference of the facing layers for specimen no. 4 (%).

Fig. 5. Failure pattern of specimen no. 4,  $l = 35$  mm,  $h = 5$  mm.

Fig. 6. Stress-strain diagram of two facing layers of specimen no. 3,  $l = 35$  mm,  $h = 10$  mm (MPa).

Fig. 7. Strain difference of the facing layers for specimen no. 3 (%).

Fig. 8. Failure pattern of specimen no. 3,  $l = 35$  mm,  $h = 10$  mm.

Fig. 9. Stress-strain diagram of two facing layers of specimen no. 2,  $l = 50$  mm,  $h = 10$  mm (MPa).

Fig. 10. Strain difference of the facing layers for specimen no. 2 (%).

Fig. 11. Failure pattern of specimen no. 2,  $l = 50$  mm,  $h = 10$  mm.

Fig. 12. Stress-strain diagram of two facing layers of specimen no. 1 with a rigid core,  $l = 50$  mm,  $h = 5$  mm (MPa).

### References

1. Petras A., Sutcliffe M.P.F. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Compos. Struct.*, 1999, vol. 44, no. 4, pp. 237–252. doi: 10.1016/S0263-8223(98)00123-8.
2. Rupp P., Elsner P., Weidenmann Kay A. Failure mode maps for four-point-bending of hybrid sandwich structures with carbon fiber reinforced plastic face sheets and aluminum foam cores manufactured by a polyurethane spraying process. *J. Sandwich Struct. Mater.*, 2019, vol. 21, no. 8, pp. 2654–2679. doi: 10.1177/1099636217722.
3. Shi H., Liu W., Fang H. Damage characteristics analysis of GFRP-Balsa sandwich beams under four-point fatigue bending. *Composites, Part A*, 2018, vol. 109, pp. 564–577. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.04.005.
4. Sokolinsky V.S., Shen H., Vaikhanski L., Nutt S.R. Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams. *Compos. Struct.*, 2003, vol. 60, no. 2, pp. 219–229. doi: 10.1016/S0263-8223(02)00293-3.
5. Jiang B., Li Zh., Lu F. Failure mechanisms of sandwich beams subjected to three-point bending. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 133, pp. 739–745. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.056.
6. Fathi A., Woff-Fabris F., Altstädt V., Gätzi R. An investigation of the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options. *J. Sandwich Struct. Mater.*, 2013, vol. 15, no. 5, pp. 487–508. doi: 10.1177/1099636213487004.
7. Alila F., Fajoui J., Gerard R., Casari P., Kchaou M., Jacquemin F. Viscoelastic behaviour investigation and new developed laboratory slamming test on foam core sandwich. *J. Sandwich Struct. Mater.*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 2049–2074. doi: 10.1177/1099636218792729.
8. Piovár S., Kormaníková E. Sandwich beam in four-point bending test: Experiment and numerical models. *Adv. Mater. Res.*, 2014, vol. 969, pp. 316–319. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.969.316.
9. Russo A., Zuccarello B. Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels. *Compos. Struct.*, 2007, vol. 81, no. 4, pp. 575–586. doi: 10.1016/j.compstruct.2006.10.007.
10. Crupi V., Epasto G., Guglielmino E. Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam. *Mar. Struct.*, 2013, vol. 30, pp. 74–96. doi: 10.1016/j.marstruc.2012.11.002.
11. Paimushin V.N., Makarov M.V., Badriev I.B., Kholmogorov S.A. Geometrically nonlinear strain and buckling analysis of sandwich plates and shells reinforced on their edge. In: *Shell Structures: Theory and Applications*. Vol. 4. London, CRC Press, 2017, pp. 267–270. doi: 10.1201/9781315166605-59.

12. Badriev I.B., Makarov M.V., Paimushin V.N. Solvability of physically and geometrically nonlinear problem of the theory of sandwich plates with transversally-soft core. *Russ. Math.*, 2015, vol. 59, no. 10, pp. 57–60. doi: 10.3103/S1066369X15100072.
13. Budiansky B., Fleck N.A. Compressive failure of fibre composites. *J. Mech. Phys. Solids*, 1993, vol. 41, no. 1, pp. 183–211. doi: 10.1016/0022-5096(93)90068-Q.
14. Jumahat A., Soutis C., Jones F.R., Hodzic A. Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading. *Compos. Struct.*, 2010, vol. 92, no. 2, pp. 295–305. doi: 10.1016/j.compstruct.2009.08.010.
15. Paimushin V.N., Tralakovskii D.V., Kholmogorov S.A. On non-classical buckling mode and failure of composite laminated specimens under the three-point bending. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2016, vol. 158, no. 3, pp. 350–375. (In Russian)
16. Paimushin V.N., Kholmogorov S.A., Makarov M.V., Tarlakovskii D.V., Lukaszewicz A. Mechanics of fiber composites: Forms of loss of stability and fracture of test specimens resulting from three-point bending tests. *Z. Angew. Math. Mech.*, 2018, vol. 99, no. 1, art. e201800063, pp. 1–25. doi: 10.1002/zamm.201800063.
17. Paimushin V.N., Gazizullin R.K., Polyakova N.V., Shishov M.A. Sandwich shells with composite facings and transversally flexible core: Refined equations and buckling modes of specimens under four-point bending tests. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (Eds.) *Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials*. Vol. 141. Springer, Cham, 2021, pp. 391–411. doi: 10.1007/978-3-030-54928-2\_29.
18. Polilov A.N. *Etyudy po mekhanike kompozitov* [Etudes on Composite Mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 2015. 320 p. (In Russian)
19. Paimushin V.N., Firsov V.A., Kholmogorov S.A., Makarov M.V. Experimental investigations of failure of sandwich specimens with composite facing layers under four-point bending conditions. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (Eds.) *Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials*. Vol. 141. Springer, Cham, 2021, pp. 377–390. doi: 10.1007/978-3-030-54928-2\_28.

---

*Для цитирования:* Холмогоров С.А., Левшонкова Н.В. Экспериментальные исследования механизмов разрушения трехслойных тест-образцов с несущими слоями из однонаправленного волокнистого композита  $[0^\circ]$  при осевом сжатии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 4. – С. 357–370. – doi: 10.26907/2541-7746.2022.4.357-370.

**For citation:** Kholmogorov S.A., Levshonkova N.V. Experimental research of the failure mechanisms of sandwich specimens with facing layers from unidirectional fiber-reinforced plastic with  $[0^\circ]$  lay-up under axial compression. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 4, pp. 357–370. doi: 10.26907/2541-7746.2022.4.357-370. (In Russian)