

*Д. Ф. Гарбин<sup>а</sup>, М. Л. Тонатто<sup>б\*</sup>, С. К. Амику<sup>а</sup>*

<sup>а</sup>*PPGE3M, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil*  
<sup>б</sup>*Group on Mechanics of Materials and Structures (GMEC) / Federal University of Santa Maria (UFSM-CS), Cachoeira do Sul, RS, Brazil.*

## **ПОВЕДЕНИЕ САНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ СТЕКЛОПЛАСТИК/ ПОЛИУРЕТАН ПРИ СЖАТИИ И ИЗГИБЕ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ<sup>1</sup>**

*D. F. Garbin, M. L. P. Tonatto\*, and S. C. Amico*

### **COMPRESSIVE AND FLEXURAL BEHAVIOR OF FIBERGLASS/ POLYURETHANE SANDWICH PANELS: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY**

**Keywords:** composites, sandwich panels, glass fiber, short fibers, fabric, polyurethane foam

The mechanical properties of sandwich panels with a polyurethane core and fiberglass faces produced by a continuous lamination process have been studied. Tensile, compression, and shear tests were performed on isolated face materials. Using a nonlinear finite-element model, the mechanical behavior of the sandwich panels in flatwise compression, edgewise compression, and bending was simulated, and a good agreement with experiments was found to exist.

**Ключевые слова:** композиты, сандвич-панели, стекловолокно, волокна короткие, ткань, пенополиуретан

Изучены механические свойства сандвич-панелей с полиуретановой сердцевинной и лицевыми слоями из стеклопластика, изготовленных методом непрерывного ламинирования. Испытания на растяжение, сжатие и сдвиг выполнены на образцах материала лицевых слоев. Результаты моделирования механического поведения сандвич-панелей при сжатии перпендикулярно слоям и по торцам с помощью нелинейного конечно-элементного анализа хорошо согласуются с экспериментальными.

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [maikson.tonato@ufsm.br](mailto:maikson.tonato@ufsm.br)  
Corresponding author: [maikson.tonato@ufsm.br](mailto:maikson.tonato@ufsm.br)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

## Введение

Сандвич-панели, состоящие из толстой сердцевины и тонких лицевых слоев (обшивок), применяют для изготовления многих конструкций, включая автофургоны, в которых благодаря хорошим теплоизоляционным свойствам и поддержке контролируемой температуры предотвращается порча скоропортящихся пищевых продуктов [1].

Лицевые слои сандвича иногда изготавливают из композита на основе стекловолокна [2, 3], широко используя непрерывное ламинирование, позволяющее крупномасштабное производство и обеспечивающее повторяемость и надежность процесса. Сандвич-сердцевину часто изготавливают из полимерного материала, в частности, пенополиуретана, обычно методом литья под давлением в закрытой пресс-форме, в которой снизу и сверху уже размещены лицевые слои. Плотность пены, структура ячеек и ее рост зависят от состава и производственного процесса [4].

Лицевые слои композита определяют большинство физико-механических свойств сандвич-панели [5]. В [6] проанализировали свойства лицевых слоев, созданных с помощью трехмерного плетения джутовой пряжи, прошитой в осевом направлении кевларовым волокном, и установили, что прочность при сжатии и изгибе в 7,7 и 3,8 раза соответственно больше, чем заготовок композитов без осевой прошивки. В [7] показали, что материал сердцевины также может влиять на нагрузку потери устойчивости сандвич-панелей, которую можно увеличить на 6%, добавив в полиуретан сердцевины 5% частиц  $Al_2O_3$ .

Сандвичам посвящено много экспериментальных и численных исследований, но лишь в некоторых анализировали нелинейные эффекты в конструкциях [8]. В [9] моделировали сандвич-панели с полиуретановой сердцевиной и алюминиевыми лицевыми слоями. Полиуретан моделировали как изотропный упругопластический материал, свойства которого зависят от скорости деформирования и подчиняются степенному закону Купера—Саймондса. В [10] провели численное моделирование сандвич-панелей с пенополиуретановой сердцевиной, используя для описания ее нелинейного поведения модель сминаемой пены, и установили максимальное различие между численными и экспериментальными результатами 7,5%. Однако данная модель требует большого количества входных параметров.

Поведение сандвич-панелей на основе пены очень сложное в силу нелинейных эффектов и механизмов повреждения, связанных со статическим и динамическим нагружением [11, 12]. В [13] исследовали механическое поведение пены при индентировании, рассматривая ее как сжимаемое гиперупругое твердое тело. В [14] проанализировали изгиб сандвич-панелей с пенопластовой сердцевиной, подвергнутых сосредоточенной нагрузке.

В настоящей работе исследовали влияние свойств материала лицевых слоев (с армирующими короткими стекловолокнами и двунаправленной

тканью из стекловолокон) на поведение сандвич-панели с полиуретановой сердцевиной. Для оценки механического отклика панелей на разные нагрузки и надежности разных типов панелей проведено нелинейное численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ).

## 1. Материалы и методы

**1.1. Материалы и процесс изготовления.** Композиты для лицевых слоев сандвич-панелей изготовили с использованием полиэфирной смолы (стандарт 10.335 от Reichhold) и арматуры из E-стекловолокон (коротких волокон P243 с номинальной погонной массой 775 г/м<sup>2</sup>) либо двунаправленной [0°/90°] ткани LT0530 с номинальной погонной массой 900 г/м<sup>2</sup>. Схема процесса непрерывного ламинирования для изготовления композитных лицевых слоев/обшивок представлена на рис. 1—а. Вкратце он состоит из следующих шагов. По длинной конвейерной ленте скользят две

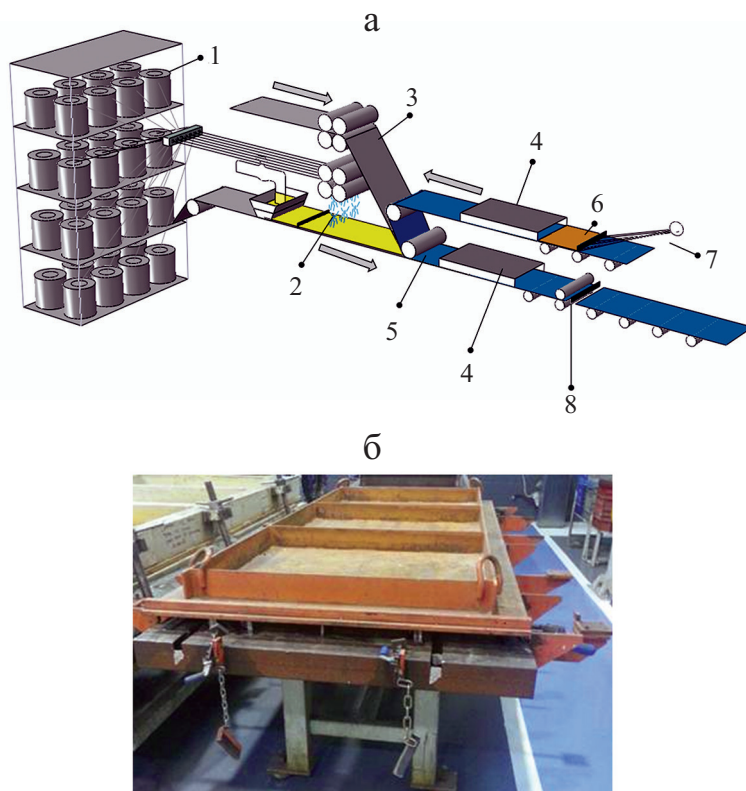


Рис. 1. Процесс непрерывного ламинирования лицевых слоев панелей из композита с короткими волокнами или ткани (а) и изготовление сандвич-панелей методом прессования (б): 1 — ровинг; 2 — рубленый ровинг; 3 — мат или ткань; 4 — печь отверждения; 5 — пленка носителя; 6 — “Doctor blade”; 7 — инжектор гелькоута; 8 — обрезка.

антипригарные пленки, между ними изготавливают композит заданной толщины. Сначала вводят смолу/катализатор, затем в нее вводят арматуру (мат из коротких волокон или ткань), сжимают полуфабрикат между пленками и нагревают до 60 °С, пропуская через печь. После ламинирования и почти полного отверждения композит хранят при температуре 23 °С для полного высвобождения остаточного мономера стирола. Конечная толщина композита 1,9 и 1,2 мм при использовании мата из коротких волокон и ткани соответственно.

Полиуретан вводили с помощью инжекторной машины Transtécnica мощностью 3,4 кВт с воздушным смесителем. Посредством рамы размером 1,0×2,5 м стеклопластиковые лицевые слои помещали в пресс-форму таким образом, чтобы получить полиуретановую сердцевину толщиной 64±1 мм. Раму помещали в основание пресс-формы с механическими ограничениями на концах, гарантирующими желаемую толщину и свойства сердцевины. Полиуретановую смесь (изоцианат : полиол, коэффициент смешивания 1,23:1) впрыскивают в пресс-форму и перерабатывают в ней в течение ~2 ч для минимизации изменения размеров или плотности, устранения неполного заполнения полости, пустот, нерегулярных размеров ячеек и усадки. Общее время отверждения 72 ч, конечная плотность пены 40 кг/м<sup>3</sup>. На рис. 1—б показано оборудование, используемое для изготовления панелей. После отверждения панели разрезали с помощью циркулярной пилы и отшлифовали для изготовления образцов желаемой формы для разных видов испытаний. Также необходимо отметить, что в изготовленном полиуретане наблюдали небольшие пустоты, наличие которых считают нормальным явлением при данном способе изготовления, но их необходимо контролировать.

**1.2. Физические и механические испытания.** Оценка свойств лицевых слоев включала физико-механические испытания. Сначала методом выжигания смолы по стандарту ASTM D5630 определили массовое содержание стекловолокон. Для механических испытаний использовали универсальную испытательную машину Instron (модель 3382), оснащенную датчиком нагрузки до 5 кН. Испытания на растяжение выполнили на прямоугольных образцах длиной 175 мм и шириной 25 мм со скоростью деформирования 2 мм/мин по стандарту ASTM D3039. Испытания на сжатие провели по стандарту ASTM D6641 на прямоугольных образцах с накладками длиной 140 и шириной 12 мм со скоростью деформирования 1,3 мм/мин. Испытания на сдвиг в плоскости выполнили по стандарту ASTM D7078 со скоростью деформирования 2 мм/мин. В центре образцы имели двойной V-образный вырез, обработанный до необходимых размеров. В каждом виде испытаний использовали от трех до пяти образцов с каждым типом арматуры.

Механические испытания сэндвич-панелей провели на том же оборудовании. Испытания сердцевины на сжатие выполнили по стандарту ASTM C365, который можно использовать как в случае непрерывной сердцевины (например, пенопластовой), так и прерывистой. Испытывали

готовые сандвич-панели, а не изолированную сердцевину во избежание использования другого нерепрезентативного метода. Образцы размером  $50 \times 50$  мм испытывали со скоростью деформирования 10 мм/мин. Испытания выполнили для обоих типов сандвичей (с лицевыми слоями из мата коротких волокон и ткани), хотя в этих испытаниях определяют прочность при сжатии и модуль упругости сердцевины. Испытания панелей размером  $500 \times 140$  мм на сжатие по торцу выполнили по стандарту ASTM C364 со скоростью деформирования 5 мм/мин.

Наконец, для определения свойств сердцевины при сдвиге провели испытания панелей на изгиб по стандарту ASTM C393 со скоростью деформирования 20 мм/мин на образцах длиной 140 мм и шириной 70 мм. Максимальное сдвиговое напряжение сердцевины и максимальное напряжение лицевых слоев вычислили исходя из максимальной нагрузки и геометрических характеристик сандвич-панели.

**1.3. Структурный анализ сандвич-панелей.** Свойства композитов (лицевых слоев) проанализировали с помощью вычислительной программы MESH-Gcomp [15]. Справочные данные для анализа взяли из экспериментальных испытаний, проведенных производителем. Для расчета модуля упругости  $E_1$  использовали подход Халпина—Цая для композита с короткими волокнами. Расчетное значение модуля упругости сравнили с экспериментальным.

Численное моделирование сандвич-панелей выполнили с помощью МКЭ и коммерческого программного обеспечения Abaqus™/Version 6.14. Использовали трехмерную конечно-элементную модель. Сначала лицевые слои смоделировали, исходя из расчетных значений упругих постоянных, а затем откалибровали с учетом экспериментальных результатов. Композит с короткими стекловолокнами считали квазиизотропным, а с двунаправленной тканью — ортотропным с одинаковыми свойствами в направлениях 0 и  $90^\circ$ .

Контакт между лицевыми слоями и сердцевиной описывали условием связанного контакта. Когезионные конечные элементы не использовали, поскольку разрушение имело место в основном в сердцевине.

На рис. 2—*a—в* показана конечно-элементная сетка, граничные условия и нагрузки при сжатии сердцевины, продольном сжатии (по торцу) и моделировании изгиба соответственно. Для задания граничных условий опирания и индентора использовали контрольные точки (КТ). При моделировании сжатия сердцевины ее верхнюю и нижнюю поверхности (контактирующие с лицевыми слоями) связали с КТ, используя ограничения типа сцепления. На нижней и верхней КТ запретили перемещения и повороты, за исключением максимального приложенного перемещения  $\delta = 50$  мм вдоль оси  $y$ . При моделировании продольного сжатия лицевые слои в плоскости  $yz$  связали с КТ, используя такое же ограничение; максимальное приложенное перемещение  $\delta = 2$  мм по оси  $x$ .

При моделировании изгиба КТ связали с кромками по оси  $z$ . Перемещения в направлении осей  $y$  и  $z$  и повороты вокруг осей  $x$  и  $y$

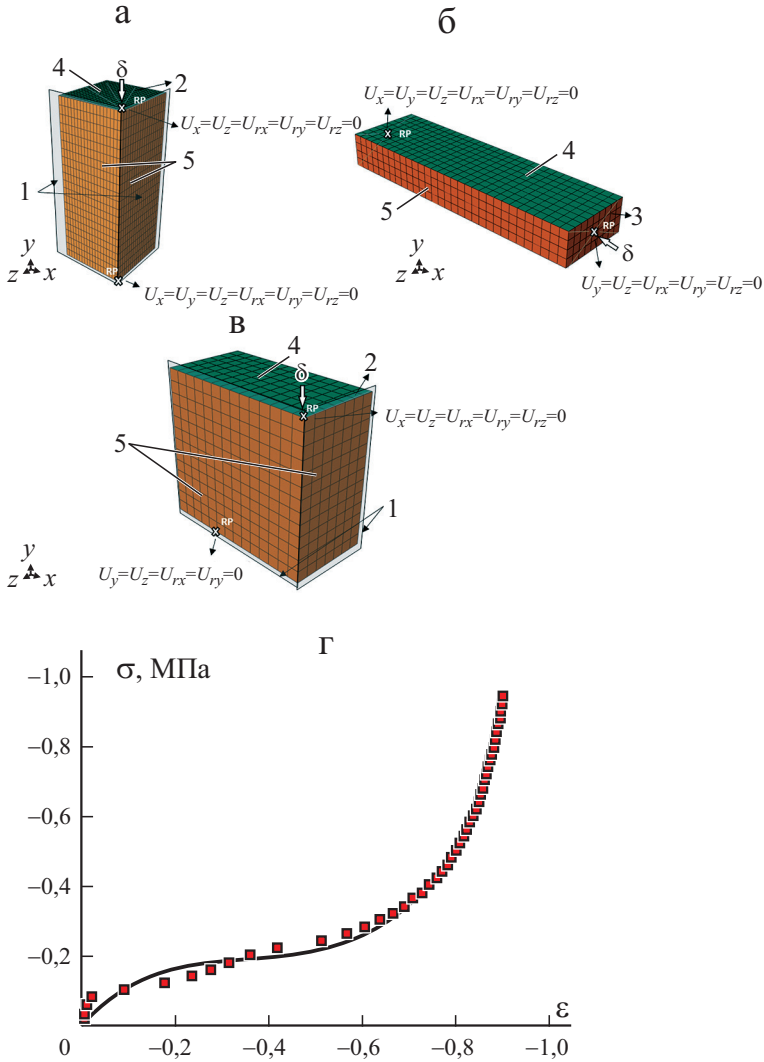


Рис. 2. Конечно-элементные модели с КТ для моделирования сжатия сердцевины (а), продольного (по торцу) сжатия (б) и изгиба (в) сандвич-панели и диаграмма деформирования  $\sigma - \epsilon$  сердцевины при сжатии (г): экспериментальные точки (■) и расчет по модели Огдена четвертого порядка (—). 1 — плоскости симметрии; 2 — связанное ограничение; 3 — лицевой слой; 4 — сердцевина.

запретили на нижней и верхней КТ, за исключением максимального приложенного смещения  $\delta = 50$  мм по оси  $y$ . Результаты сил реакции и перемещений получили на КТ. Пенопласт смоделировали, используя модель гиперупругой пены (*hyperfoam*), реализованную на основе реальной диаграммы деформирования  $\sigma - \epsilon$  пенополиуретана, полученной при испытании сердцевины на сжатие (рис. 2—г). Подгонку

экспериментальных данных провели по модели Огдена четвертого порядка [16] (см. рис. 2—2).

Конечно-элементную сетку сердцевины панели создали, используя восьмиузловые линейные элементы C3D8R с редуцированным интегрированием, а лицевых слоев панели — четырехузловые линейные элементы S4R с редуцированным интегрированием. Сходимость решения МКЭ при сжатии исследовали для трех размеров конечного элемента (5, 3 и 1 мм) с общим количеством элементов в модели 5415, 8303 и 23 826 соответственно. Результаты с элементами 1 мм существенно не отличались от результатов с элементами 3 мм. Поэтому для анализа выбрали сетки с элементами размером 3 мм. Такую же процедуру выполнили для других условий нагружения. При моделировании сжатия сердцевины использовали стандартную сетку с элементами 3 мм; всего 8303 элемента и 8800 узловых точек. При моделировании изгиба использовали стандартную сетку с элементами 5 мм; всего 1470 элементов и 1680 узловых точек. При моделировании продольного сжатия использовали стандартную сетку с элементами 8 мм; всего 11 340 элементов и 10 944 узловых точек.

## 2. Результаты и обсуждение

**2.1. Физические и механические свойства лицевых слоев из стеклопластика.** В табл. 1 приведены значения физико-механических характеристик композитов лицевых слоев панелей. Объемное содержание волокон  $V_f$  композита из двунаправленной ткани больше, чем из мата с короткими волокнами. Непрерывные и ориентированные волокна ткани обусловили лучшие механические свойства лицевых слоев из тканого композита при растяжении (большую прочность и модуль упругости, меньшую предель-

Табл. 1

Физические и механические свойства лицевых слоев сандвич-панелей из стеклопластика

Свойство	Стеклопластик	
	с короткими волокнами	тканый
Массовое содержание волокон $W_p$ , %	39 ± 0,6*	54 ± 1,4
Максимальная растягивающая деформация, %	1,26 ± 0,09	1,15 ± 0,08
Прочность при растяжении, МПа	100 ± 7,8	146 ± 6,2
Модуль упругости продольный, ГПа	8,0 ± 0,3	13 ± 0,5
Максимальная сжимающая деформация, %	0,83 ± 0,04	0,43 ± 0,01
Прочность при сжатии, МПа	173 ± 8,5	150 ± 7,6
Максимальная сдвиговая деформация, %	1,61 ± 0,04	1,83 ± 0,08
Прочность при сдвиге, МПа	43 ± 4,8	34 ± 3,6

\*Стандартное отклонение.

ную деформацию). Оба композита демонстрируют хрупкое поведение. Значение модуля упругости 7,98 ГПа для композита с короткими волокнами, рассчитанное с помощью программы Mesh-G, очень близко к экспериментальному. Из данных таблицы также видно, что лицевые слои из композита с короткими волокнами имели наибольшую прочность и предельную деформацию при сжатии. Сдвиговая прочность лицевых слоев из ткани на 21% меньше, чем из композита с короткими волокнами, даже несмотря на большее содержание волокон в тканом композите. Это можно объяснить случайной ориентацией коротких волокон во всех направлениях, включая  $\pm 45^\circ$ , а волокна ткани ориентировали только в направлениях 0 и  $90^\circ$ .

**2.2. Сравнение численных и экспериментальных результатов сэндвич-панелей.** На рис. 3 показаны диаграммы деформирования при продольном сжатии сэндвич-панелей из композитов с короткими волокнами и тканью. На диаграммах видны три характерные зоны: начальная линейно-упругая; зона, связанная с разрушением ячеек при почти постоянном напряжении; зона повышенной плотности сердцевины, в которой напряжение возрастает экспоненциально. Такое поведение характерно для пенополимеров [17]. Сравнение данных рис. 3—*а* и *б* свидетельствует о том, что материал лицевых слоев не оказывает существенного влияния на поведение сердцевины панели при сжатии. Наблюдаемый разброс экспериментальных данных образцов, особенно в зоне разрушения ячеек сердцевины, связан с изменением морфологии пены. Учитывая эти результаты, можно ожидать аналогичное поведение сердцевины в других видах испытаний. На рис. 3 также представлена геометрия деформированных панелей, соответствующая каждой зоне. Большую деформацию наблю-

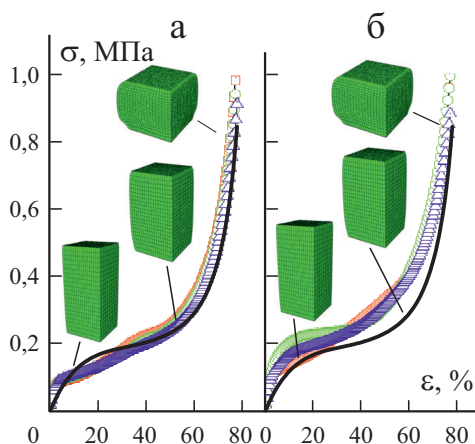


Рис. 3. Диаграммы деформирования при продольном сжатии  $\sigma$  —  $\varepsilon$  панелей из композита с короткими волокнами (*а*) и из двунаправленной ткани (*б*). Эксперимент: образцы 1 (—□—), 2 (—○—), 3 (—Δ—) и расчет МКЭ (—).



дали в зоне уплотнения сердцевины. Деформированные формы панелей с рассмотренными типами композита лицевых слоев аналогичны.

В силу большого количества параметров, влияющих на механический отклик сандвич-панелей, их компьютерное моделирование является сложным, и разработано лишь несколько моделей, способных точно предсказать такое поведение [18]. Моделирование, представленное в настоящей работе, ориентировано на рассмотрение диаграмм первой и второй зон деформирования сандвич-панелей, соответствующих рабочему диапазону данного материала в автомобильном секторе. На рис. 3 показаны расчетные диаграммы деформирования, согласующиеся с экспериментальными.

Экспериментальные значения максимальной сжимающей нагрузки сандвич-панелей с лицевыми слоями из композитов с короткими волокнами и тканью  $10,367 \pm 966$  и  $11,851 \pm 2,633$  кН соответственно и расчетные значения  $10,933$  и  $13,366$  кН хорошо согласуются. Результаты такого анализа больше зависят от свойств лицевых слоев, чем сердцевины. Как правило, такие исследования проводят на панелях, у которых один конец свободен, а другому разрешены произвольные перемещения и вращение [19].

Хотя в используемой модели предположили идеальную адгезию между лицевыми слоями и сердцевиной, с ее помощью также удалось определить максимальную нагрузку потери устойчивости. Потеря сцепления лицевого слоя с сердцевиной при испытании произошла в силу большого различия их модулей упругости, обусловивших увеличение сдвиговых нагрузок на поверхности раздела. Это отрицательно влияет на общие характеристики таких панелей, а проблема требует инженерного решения [20]. В автомобильных применениях сандвич-панели при одинаковых условиях нагружения устанавливают, ограничивая перемещения обоих концов, так что лицевые слои не могут в этой области отделиться от сердцевины, что имеет решающее значение с точки зрения потери сцепления. Испытания на сжатие, которые легко выполнить и получить надежные результаты, можно использовать для оценки адгезии в сандвичах и их общего разрушения [21]. Другие виды разрушения, такие как сдвиг сердцевины, смятие и сдвиг лицевого слоя, в рассмотренных сандвич-панелях не наблюдали [22].

На рис. 4 представлены диаграммы изгибающая нагрузка—прогиб и деформированная геометрия панелей при испытании на трехточечный изгиб, демонстрирующие большой разброс экспериментальных результатов. Как правило, нагрузка возрастала линейно с прогибом до тех пор, пока сердцевина не начинала разрушаться под действием сжатия и особенно касательных напряжений. Поведение панелей с лицевыми слоями из композита с короткими волокнами (см. рис. 4—*a*) и ткани (рис. 4—*b*) аналогичное. По большей части панели продемонстрировали нелинейное поведение в силу сильно нелинейной деформации сердцевины. Поскольку деформации лицевых слоев намного меньше, чем сердцевины, для упрощения численной модели нелинейностью лицевых слоев можно пренебречь [23].

Макроскопическое разрушение сандвич-панелей при изгибе может происходить в силу отделения и разрушения при сжатии верхнего лицевого

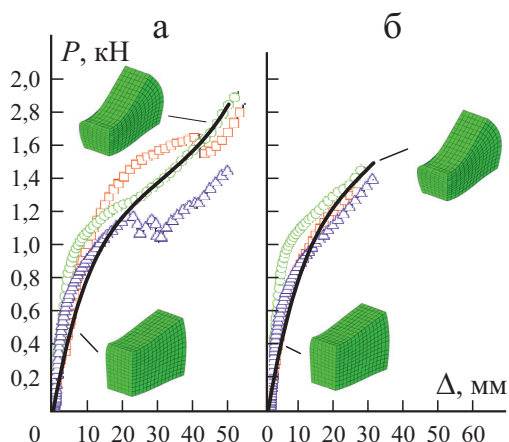


Рис. 4. Диаграммы изгибающая нагрузка—прогиб  $P$ — $\Delta$  панелей из композита с короткими волокнами (а) и из двунаправленной ткани (б). Эксперимент: образцы 1 (—□—), 2 (—○—), 3 (—△—) и расчет МКЭ (—).

слоя и/или разрушения сердцевины в результате сдвига. В первом случае сдвиговое напряжение превышает адгезионную прочность на поверхности раздела верхнего лицевого слоя и сердцевины. Во втором случае сжимающее напряжение в верхнем лицевом слое превосходит его прочность при сжатии. В третьем случае сдвиговое напряжение в сердцевине превышает ее сдвиговую прочность. В испытаниях на изгиб, проведенных в настоящей работе, наблюдали отделение лицевого слоя, т.е. адгезионное разрушение, которое можно минимизировать, добавив армирующие элементы, соединяющие лицевые слои и сердцевину [24].

Сравнение экспериментальных и численных результатов при изгибе продемонстрировало аналогичную тенденцию, но расчетные значения были меньше. Различия можно объяснить тем, что адгезию между лицевыми слоями и сердцевинной в численной модели предположили идеальной и адекватно соответствующей модели гиперупругой пены в реальных образцах. Можно ожидать, что для более крупных панелей различие будет меньше, поскольку в этом случае прогиб распределится по большей площади и поведение панелей будет ближе к классической балке Эйлера, сводя к минимуму влияние сдвига в сердцевине.

В табл. 2 приведены значения механических свойств сандвич-панелей с двумя типами лицевых слоев. Прочность сердцевины при сжатии у обоих сандвич-панелей почти одинакова. При продольном сжатии прочность панелей из тканого композита на  $\sim 14\%$  больше, хотя толщина лицевого слоя из тканого композита и прочность при сжатии были меньше. Это можно объяснить тем, что сопротивление потере устойчивости возрастает с увеличением модуля упругости лицевых слоев [25]. Также видно, что прогиб и максимальная изгибающая нагрузка панели с лицевыми слоями

Механические свойства сандвич-панелей

Свойство	Стеклопластик	
	с короткими волокнами	тканый
Прочность при плоскопараллельном сжатии, МПа	0,954 ± 0,0337*	0,967 ± 0,0697
Максимальная продольная сжимающая деформация, %	1,01 ± 0,08	1,00 ± 0,09
Прочность при продольном сжатии, МПа	1,134 ± 0,103	1,346 ± 0,998
Максимальный прогиб, мм	53 ± 2,1	28 ± 2,1
Максимальная изгибающая нагрузка, Н	1742 ± 259,9	1398 ± 72,5
Максимальное сдвиговое напряжение, МПа	0,19 ± 0,03	0,15 ± 0,09
Максимальное напряжение в лицевом слое, МПа	4,97 ± 0,74	6,38 ± 0,33

\*Стандартное отклонение.

из композита с короткими волокнами больше. Таким образом, при изгибе влияние толщины лицевых слоев было решающим при оптимизации характеристик сандвич-панелей. Кроме того, максимальное сдвиговое напряжение в сердцевине у панели с лицевыми слоями, содержащими короткие волокна, на 21% больше, а максимальное напряжение в лицевом слое — на 28% больше, чем панели из тканого композита. Стандартное отклонение свидетельствует об отсутствии значительного различия значений максимального сдвигового напряжения в сердцевине. Однако в отношении максимального напряжения в лицевом слое панели из тканого композита лучше, что может быть обусловлено его большей прочностью при растяжении.

Механические характеристики изученных сандвич-панелей также сравнивали с характеристиками аналогичных конструкций, описанных в литературе. Моды разрушения и общие результаты, полученные в настоящей работе, оказались совместимыми с приведенными в [26], где рассмотрели последние достижения в создании многослойных конструкций на основе пенополиуретана. В [27] исследовали сандвич-панели из двунаправленной [0°/90°] ткани E-стекловолокон (погонная масса 800 г/м<sup>2</sup>, толщина 0,24 мм, массовое содержание волокон 55%) и сердцевины из полиуретана. При трехточечном изгибе максимальное сдвиговое напряжение в сердцевине 0,16 МПа, что является промежуточным значением между полученными в настоящей работе. В [27] также провели испытания при сжатии по торцу и получили значение прочности 8,9 МПа, что в ~ 6,6 раза больше, чем в настоящей работе. Это несоответствие подтверждает преждевременное разрушение в силу потери устойчивости, наблюдаемое у рассмотренных в настоящей работе образцов. В [28] изучали сандвич-панели с лицевыми слоями из композита с рублеными стекловолокнами в полиэфирном связующем и пенополиуретановой сердцевиной и установили, что мак-

симальные значения сдвигового напряжения в сердцевине и лицевом слое при трехточечном изгибе 0,67 и 33 МПа соответственно.

### Заключение

В настоящей работе изготовили сандвич-панели с сердцевиной из пенополиуретана и лицевыми слоями из полиэфирных стеклопластиков, хаотически армированных короткими Е-стекловолокнами (случайное армирование) или двунаправленной тканью из стекловолокон. Панели, изготовленные методом непрерывного ламинирования, имели разную толщину и содержание волокон в зависимости от типа армирования. Панели исследовали при плоскопараллельном сжатии, продольном сжатии и изгибе. Физические и механические свойства лицевых слоев определили путем физико-механических испытаний.

Более тонкие лицевые слои из ткани  $[0^\circ/90^\circ]$ , но с большим содержанием волокон, продемонстрировали большую прочность и модуль упругости при растяжении, но меньшую прочности при сжатии и сдвиге.

Моделирование МКЭ выполнили для воспроизведения механических испытаний, проведенных на сандвич-панелях. Результаты численного моделирования продемонстрировало хорошее согласование с экспериментальными при всех рассмотренных случаях нагружения. Используемая модель гиперупругой пены хорошо согласуется с нелинейными экспериментальными диаграммами деформирования сандвич-панелей при сжатии и изгибе. Полученные результаты также подтверждают важность выполнения независимых испытаний для определения характеристик лицевых слоев и сердцевины панелей для их более надежного численного анализа.

*Благодарность.* Авторы благодарны С. А. Рэндону за вклад в изготовление и подготовку образцов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fahrzeugbau H.* Sandwichelemente für den Fahrzeugbau: Aufbau, Fertigung, Montage, Anwendung. — Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2006.
2. *Agarwal B. D., Broutman L. J., and Chandrashekhara K.* Analysis and Performance of Fiber Composites. — New Delhi: John Wiley & Sons, 2006.
3. ASTM INTERNATIONAL, D3878-16. Standard terminology for composite materials. — West Conshohocken, 2016.
4. *Torreira R. P.* Isolamento Térmico. — São Paulo: Fulton Editora Técnica, 1980.
5. *Djama K., Michel L., Gabor A., and Ferrier E.* Mechanical behaviour of a sandwich panel composed of hybrid skins and novel glass fibre reinforced polymer truss core // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 215. — P. 35—48.
6. *Li Z., Wei X., Gao Z., et al.* Manufacturing and mechanical characterization of polyurethane resin based sandwich composites for three-dimensional fabric reinforcement // *Mater. Today Commun.* — 2020. — Vol. 24. — No. 101046.

7. Khan T., Aydın O. A., Acar V., et al. Experimental investigation of mechanical and modal properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced polyurethane core sandwich structures // Mater. Today Commun. — 2020. — Vol. 24. — No. 101233.
8. Sayahlatifi S., Rahimi G. H., and Bokaei A. The quasi-static behavior of hybrid corrugated composite/balsa core sandwich structures in four-point bending: Experimental study and numerical simulation // Eng. Struct. — 2020. — Vol. 212. — No. 110361.
9. Jamil A., Guana Z. W., Cantwell W. J., et al. Blast response of aluminium/thermo-plastic polyurethane sandwich panels — experimental work and numerical analysis // Int. J. Impact Eng. — 2019. — Vol. 127. — P. 31—40.
10. Abbasi M. and Nia A. A. High-velocity impact behavior of sandwich structures with AL faces and foam cores — Experimental and numerical study // Aerosp. Sci. Technol. — 2020. — Vol. 105. — No. 106039.
11. Bey K., Tadjine K., Khelif R., et al. Mechanical behavior of sandwich composites under three-point bending fatigue // Mech. Compos. Mater. — 2015. — Vol. 50. — P. 747—756.
12. Özen M. Influence of stacking sequence on the impact and postimpact bending behavior of hybrid sandwich composites // Mech. Compos. Mater. — 2017. — Vol. 52. — P. 759—766.
13. Ignatova A. V. and Sapozhnikov S. B. Two-scale modeling of the mechanical behavior of a composite foam // Mech. Compos. Mater. — 2015. — Vol. 51. — P. 655—660.
14. Xie Z., Li Zh. and You J. L. An approximate solution to the plastic response of clamped sandwich beams under concentrated loading // Mech. Compos. Mater. — 2016. — Vol. 52. — P. 359—368.
15. URL: <http://www.ufrgs.br/mechcomp/> (reference date: 20/Oct/2020)
16. URL: <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (reference date: 18/Dez/2020)
17. Mohamed M., Anandan S., Huo Z., et al. Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures // Compos. Struct. — 2015. — Vol. 123. — P. 169—179.
18. Sadighi M. and Hosseini S. A. Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3D woven glass fiber composite sandwich panels // Composites: Part B. — 2013. — Vol. 55. — P. 158—166.
19. Correia J. R., Garrido M., Gonilha J. A., et al. GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications: effects of introducing strengthening ribs // Int. J. Struct. Integr. — 2012. — Vol. 3, No. 2. — P. 127—147.
20. Vadakke V. and Carlsson L. A. Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond // Composites: Part B. — 2004. — Vol. 35, Nos. 6—8. — P. 583—590.
21. Manalo A. C. Behaviour of fibre composite sandwich structures under short and asymmetrical beam shear tests // Compos. Struct. — 2013. — Vol. 99. — P. 339—349.
22. Fleck N. A. and Sridhar I. End compression of sandwich columns // Composites: Part A. — 2002. — Vol. 33, No. 3. — P. 353—359.
23. Mostafa A., Shankar K. and Morozov E. V. Influence of shear keys orientation on the shear performance of composite sandwich panel with PVC foam core: numerical study // Mater. Des. — 2013. — Vol. 51. — P. 1008—1017.
24. Wang L., Liu W., Wan L., et al. Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: experimental investigation and analytical modeling // Composites: Part B. — 2014. — Vol. 67. — P. 270—279.
25. Yeh W. N. and Wu Y. E. Enhancement of buckling characteristics for sandwich structure with fiber reinforced composite skins and core made of aluminum honeycomb and polyurethane foam // Theor. Appl. Fract. Mech. — 1991. — Vol. 15, No. 1. — P. 63—74.

26. *Khan T., Acar V., Aydin M. R., et al.* A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores // *Polym. Compos.* — 2020. — Vol. 41, No. 6. — P. 1—46.

27. *Henaó A., Carrera M., Miravete A. and Castejón L.* Mechanical performance of through-thickness tufted sandwich structures // *Compos. Struct.* — 2010. — Vol. 92. P. 2052—2059.

28. *Abdi B., Azwan S., Abdullah M. R., et al.* Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composites and sandwich panels // *Int. J. Mech. Sci.* — 2014. — Vol. 88. — P. 138—144.

Поступила в редакцию 25.11.2020

Окончательный вариант поступил 02.03.2021

Received Nov. 25, 2020 (March 2, 2021)

---