

## АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛИМЕРНОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ С НЕСУЩИМИ СЛОЯМИ В ТРЁХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

© 2021

**С. А. Павлова** инженер научно-образовательного центра авиационных конструкций;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[pavlova-sva@yandex.ru](mailto:pavlova-sva@yandex.ru)

Рассматривается задача исследования механических характеристик трёхслойных композитных конструкций на границе контакта несущих слоёв и лёгкого заполнителя. Приводятся результаты прочностных испытаний образцов трёхслойных конструкций с обшивками из высокопрочных углепластиков и полимерным сотовым заполнителем при различных случаях нагружения. Отмечается, что при испытаниях на четырёхточечный изгиб и чистый сдвиг имеет место расхождение в определении предельных касательных напряжений. В целях интерпретации экспериментальных данных проводится численный анализ зоны контактного взаимодействия обшивок и заполнителя трёхслойной композитной конструкции. Отмечается, что наличие существенных нормальных напряжений в клеевом слое при сдвиговых испытаниях приводит к отрыву несущих слоёв от заполнителя и занижению значений касательных напряжений на величину порядка 20% по сравнению с результатами испытаний на четырёхточечный изгиб. Предлагаются рекомендации по назначению предельных сдвиговых напряжений для использования в практических расчётах трёхслойных композитных конструкций.

*Трёхслойные конструкции; композиционные материалы; испытания; математическое моделирование; касательные напряжения; предельные характеристики*

---

*Цитирование:* Павлова С.А. Анализ контактного взаимодействия полимерного сотового заполнителя с несущими слоями в трёхслойных конструкциях // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 1. С. 87-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-87-96

---

### Введение

Проектирование высоконагруженных трёхслойных панелей пола с использованием современных высокопрочных угле- и стеклопластиков для несущих слоёв и полимерного сотового заполнителя показывает, что активным ограничением оказывается прочность в зоне контакта обшивок и лёгкого заполнителя [1]. При этом стабильность механических характеристик трёхслойных конструкций и композиционных материалов, работающих в её составе, зависит от технологии изготовления панелей. В традиционных технологиях [2; 3] зона контакта формируется с использованием жидких клеев или клеевых плёнок, что зачастую приводит к созданию перетяжелённых конструкций [4]. В ряде новых технологий все более широкое применение находят препреги на основе клеевого связующего [5 – 7]. Они позволяют изготавливать трёхслойные конструкции за один технологический цикл, в ходе которого происходит одновременное формирование несущих слоёв и их склеивание с заполнителем. При этом предусматривается повышенная толщина препрега с внутренней стороны несущего слоя, которая выполняет ту же функцию, что и клеевая плёнка.

Исследование прочностных свойств трёхслойных панелей с обшивками на основе клеевых препрегов показывает, что наиболее существенным силовым фактором для таких конструкций являются касательные напряжения в зоне контакта несущих слоёв и заполнителя, что может являться причиной расслоения. Для оценки прочности зоны стыка с использованием тех или иных критериев прочности необходимо знание и задание предельных механических характеристик несущих слоёв и сотового заполнителя,

которые определяются экспериментально. К числу таких характеристик относятся: предел прочности на растяжение и сжатие сотового заполнителя в направлении сот, предельная прочность заполнителя на сдвиг, изгибная прочность несущих слоёв. В дополнение к прочностным характеристикам для расчётов трёхслойных конструкций необходимо знание упругих характеристик: модулей упругости, коэффициентов Пуассона и модулей сдвига монослоя обшивок и сотового заполнителя. Нормальные напряжения сотового заполнителя на растяжение  $[\sigma_z]_{com}^+$  и сжатие  $[\sigma_z]_{com}^-$  определяются простыми испытаниями [8; 9]. Для определения прочности сотового заполнителя на сдвиг  $[\tau_{xz}]$  предлагается два стандартных принципиально разных метода испытаний [10; 11], которые позволяют также оценить прочность контактного взаимодействия несущих слоёв и сотового заполнителя. Целью данной работы является анализ особенностей этих методик и разработка практических рекомендаций по использованию экспериментальных данных при проектировании трёхслойных конструкций.

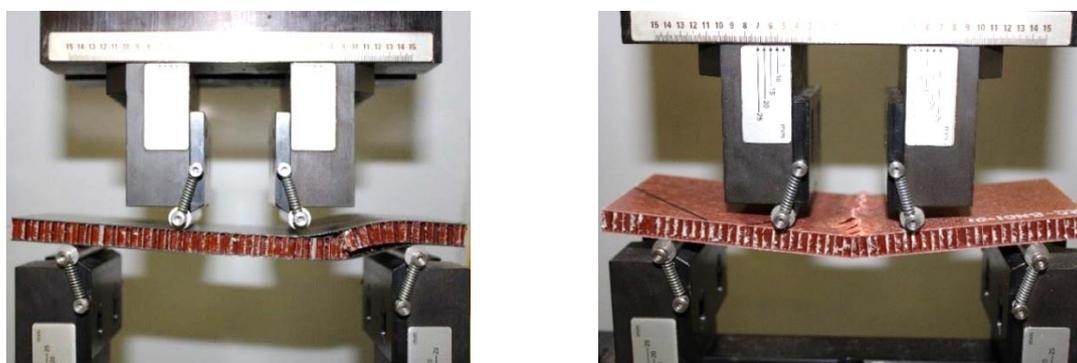
### Экспериментальные исследования

Для определения предельных касательных напряжений в зоне стыка используются методы испытаний, в которых фрагменты трёхслойных панелей испытываются как элементы конструкций. Основными видами испытаний трёхслойных панелей являются: испытания на четырёхточечный изгиб так называемой длинной балки и испытания на сдвиг. По результатам испытаний образцов трёхслойных сотовых панелей пола на четырёхточечный изгиб с постоянной скоростью нагружения до разрушения определяются следующие механические характеристики: предел сдвиговой прочности сотового заполнителя при изгибе  $[\tau_{xz}]$  и предел изгибной прочности несущих слоёв  $[\sigma_{fx}]$ . Для расчёта предела сдвиговой прочности сотового заполнителя при изгибе в международном стандарте испытаний ASTM C 393 [10] используется следующая зависимость:

$$\tau_{xz} = \frac{P_{max}}{(d+c)b}, \quad (1)$$

где  $P_{max}$  – разрушающее усилие, Н;  $d$  – толщина трёхслойной сотовой панели, мм;  $c$  – толщина сотового заполнителя, мм;  $b$  – ширина образца, мм.

Особенностью данного вида испытаний, показанного на рис. 1, является нагружение образца на двух крайних участках постоянной перерезывающей силой и постоянным изгибающим моментом в центральной зоне.



а  
б  
Рис. 1. Испытания на четырёхточечный изгиб образцов трёхслойных сотовых панелей с несущими слоями из: а – клевого углепластика; б – клевого стеклопластика

При этом испытания осложняются определённой концентрацией напряжений на опорах и под нагружающими элементами (рис. 1, *a*), а также значительными деформациями несущих слоёв, близкими к предельным, при изгибе образцов (рис. 1, *б*).

Стандарт испытаний ASTM C 273 [11] подразумевает испытания фрагментов трёхслойных панелей на так называемый чистый сдвиг. Схема нагружения образцов трёхслойных конструкций показана на рис. 2, *a*. Для передачи нагружающего усилия в рабочую зону образца используются специальные стальные накладки. Перед проведением испытаний внешние поверхности обшивок трёхслойных панелей обрабатываются абразивом, не допуская повреждения угле- и стеклопластика, после чего производится склеивание образцов с накладками с использованием эпоксидного клея. После полимеризации клея образцы устанавливаются в специальную испытательную оснастку, которая обеспечивает имитацию работы конструкции на чистый сдвиг за счёт шарнирного крепления накладок (рис. 2, *б*). Однако стоит отметить, что в испытаниях на сдвиг имеет место концентрация напряжений в краевой зоне образцов, которая приводит к отслаиванию несущих слоёв от сотового заполнителя (рис. 2, *в*).



Рис. 2. Испытания на сдвиг образцов трёхслойных сотовых панелей:  
*a* – схема нагружения; *б* – общий вид установки образцов в испытательной оснастке;  
*в* – характер разрушения образцов с обшивками из клевого углепластика

По результатам испытаний образцов трёхслойных сотовых панелей пола на сдвиг определяются следующие механические характеристики: предел сдвиговой прочности сотового заполнителя  $[\tau_{xz}]$  и модуль сдвига сотового заполнителя  $G_{xz}$ .

Для расчёта предела сдвиговой прочности сотового заполнителя при сдвиге в соответствии с [11] используется следующая зависимость:

$$\tau_{xz} = \frac{P_{\max}}{L b}, \quad (2)$$

где  $P_{\max}$  – разрушающее усилие, Н;  $L$  – длина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм.

Модуль сдвига сотового заполнителя  $G_{xz}$  определяется в соответствии с выражением:

$$G_{xz} = \frac{\alpha c}{L b}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – отношение приращения усилия к приращению перемещений гидравлического штока испытательной машины;  $c$  – толщина сотового заполнителя, мм;  $L$  – длина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм.

Для оценки стабильности результатов испытаний серии из 10 образцов для каждой из определяемых механических характеристик рассчитывался коэффициент вариации CV (табл. 1).

Таблица 1. Механические характеристики трёхслойных панелей с обшивками из клеевой углепластика и полимерным сотовым заполнителем с плотностью сот 96 кг/м<sup>3</sup>

Характеристики	+20°C	CV, %
Предел прочности сотового заполнителя на сжатие $[\sigma_z]_{com}^-$ , МПа	6,2	13,1
Модуль упругости сотового заполнителя $E_z$ , МПа	182,0	7,6
Предел сдвиговой прочности сотового заполнителя при испытании на изгиб $[\tau_{xz}]_c$ , МПа	2,1	11,9
Предел сдвиговой прочности сотового заполнителя при испытании на сдвиг $[\tau_{xz}]_c$ , МПа	1,7	6,1
Модуль сдвига сотового заполнителя $G_{xz}$ , МПа	14,1	6,9
Предел прочности сотового заполнителя на растяжение $[\sigma_z]_{com}^+$ , МПа	2,7	5,2

Результаты испытаний образцов показывают, что разрушение происходило вследствие исчерпания несущей способности трёхслойной конструкции на границе взаимодействия несущих слоёв и сотового заполнителя. Кроме того, следует отметить, что для одного и того же вида трёхслойных панелей предельные сдвиговые напряжения  $[\tau_{xz}]$  для двух видов испытаний показывают устойчивую разницу в значениях касательных напряжений на величину порядка 20%. В связи с этим в данной работе предпринята попытка анализа напряжённо-деформированного состояния зоны контактного взаимодействия обшивок и заполнителя в образцах трёхслойных конструкций в двух видах испытаний – на четырёхточечный изгиб и сдвиг.

### Математическое моделирование

В целях интерпретации результатов испытаний образцов трёхслойных панелей пола на четырёхточечный изгиб и сдвиг и их дальнейшего использования в процессе проектирования высоконагруженных трёхслойных конструкций проводилась идентификация математических моделей.

В качестве исходных данных использовались графики «сила-перемещение» и экспериментальные данные о механических характеристиках компонентов трёхслойных конструкций. Испытательные образцы и соответствующие модели включали в себя два типа материалов – клеевой углепластик для несущих слоёв и полимерный сотовый заполнитель. Механические свойства материалов обшивок и сотового заполнителя, используемые в модели, показаны на рис. 3.

	A	B	
1	Property	Value	
2	Density	96	kg m <sup>-3</sup>
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	1	MPa
10	Young's Modulus Y direction	1	MPa
11	Young's Modulus Z direction	182	MPa
12	Poisson's Ratio XY	0,49	
13	Poisson's Ratio YZ	0,001	
14	Poisson's Ratio XZ	0,001	
15	Shear Modulus XY	1E-06	MPa
16	Shear Modulus YZ	7	MPa
17	Shear Modulus XZ	15	MPa
18	Orthotropic Stress Limits		

**Заполнитель**

*a*

1	Property	Value	
2	Density	1630	kg m <sup>-3</sup>
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	1,32E+05	MPa
10	Young's Modulus Y direction	7700	MPa
11	Young's Modulus Z direction	7700	MPa
12	Poisson's Ratio XY	0,258	
13	Poisson's Ratio YZ	0,4	
14	Poisson's Ratio XZ	0,258	
15	Shear Modulus XY	4700	MPa
16	Shear Modulus YZ	3100	MPa
17	Shear Modulus XZ	4700	MPa
18	Orthotropic Stress Limits		
28	Orthotropic Strain Limits		
38	Tsai-Wu Constants		
42	Puck Constants		

**Несущие слои**

*б*

Рис. 3. Механические характеристики материалов обшивок и сотового заполнителя (МПа)

Несущие слои, сотовый заполнитель, зона контактного взаимодействия обшивок и заполнителя, а также стальные накладки в случае испытания на сдвиг моделировались с использованием твердотельных элементов типа SOLID 186. Данный тип конечных элементов поддерживает свойства анизотропного материала. При этом направления упругих и прочностных свойств используемых материалов задаются в локальной системе координат элемента, которая, в свою очередь, соответствует направлениям координат слоя. Характерный размер конечных элементов в несущих слоях, сотовом заполнителе и стальных накладках в случае испытания на сдвиг задавался равным 0,3×0,3×0,3 мм. Зона контактного взаимодействия обшивок и заполнителя описывалась конечными элементами с размерами в плане 0,3×0,3 мм, толщиной 0,05 мм и механическими характеристиками клеяющего связующего.

Геометрическая модель образца для испытаний на четырёхточечный изгиб представлена на рис. 4, *a*. Схема нагружения и граничные условия в конечноэлементной модели (КЭМ) соответствовали балке на двух опорах, нагруженной двумя сосредоточенными силами (рис. 4, *б*).

Статический расчёт на прочность КЭМ образца для испытаний на четырёхточечный изгиб выполнялся на разрушающую нагрузку величиной 3500 Н. Результаты расчёта напряжённно-деформированного состояния модели представлены на рис. 5.

Геометрическая модель образца для испытания на сдвиг, граничные условия и схема нагружения, а также результаты расчёта напряжённно-деформированного КЭМ образца показаны на рис. 6. Расчёт выполнен на разрушающую нагрузку величиной 20 000 Н.

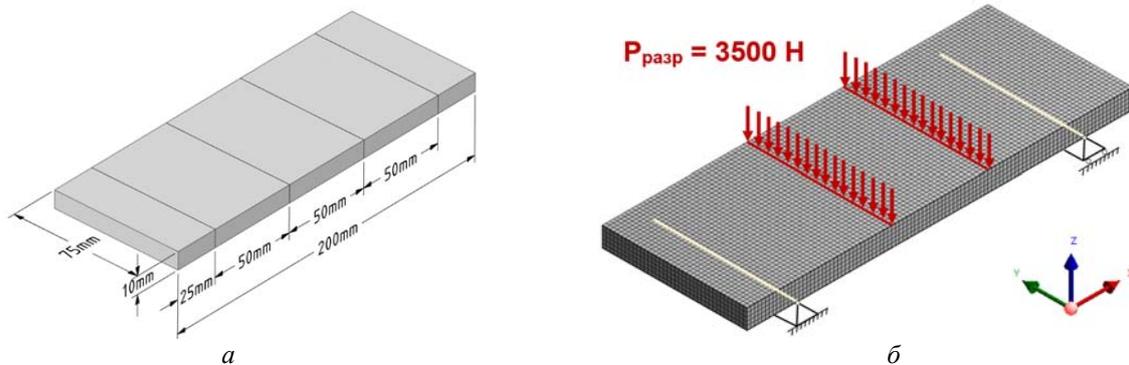


Рис. 4. Математическое моделирование образца трёхслойной панели для испытания на четырёхточечный изгиб:  
*a* – геометрическая модель; *б* – граничные условия в КЭМ

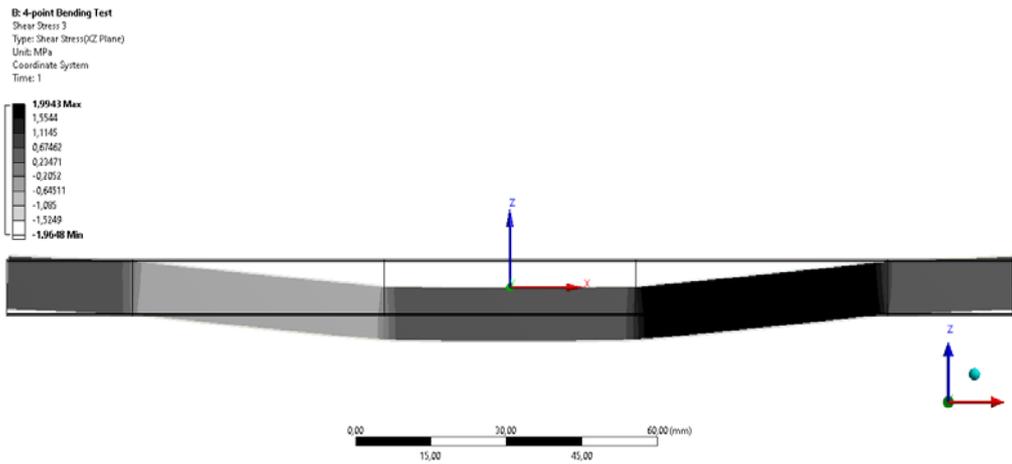


Рис. 5. Результаты расчёта образца трёхслойной конструкции для испытания на изгиб: касательные напряжения  $\tau_{xz}$  в заполнителе, МПа (масштабный коэффициент – 3,5)

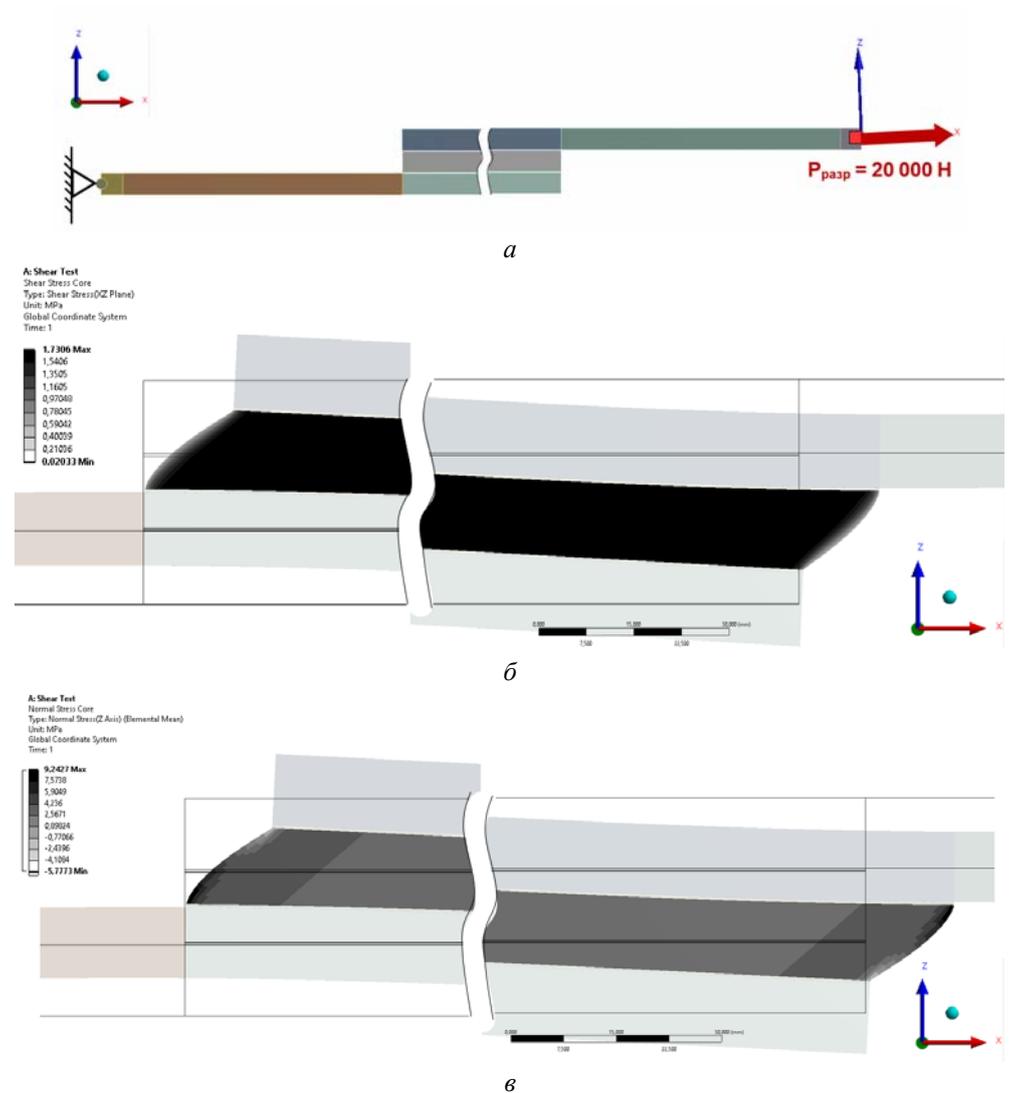
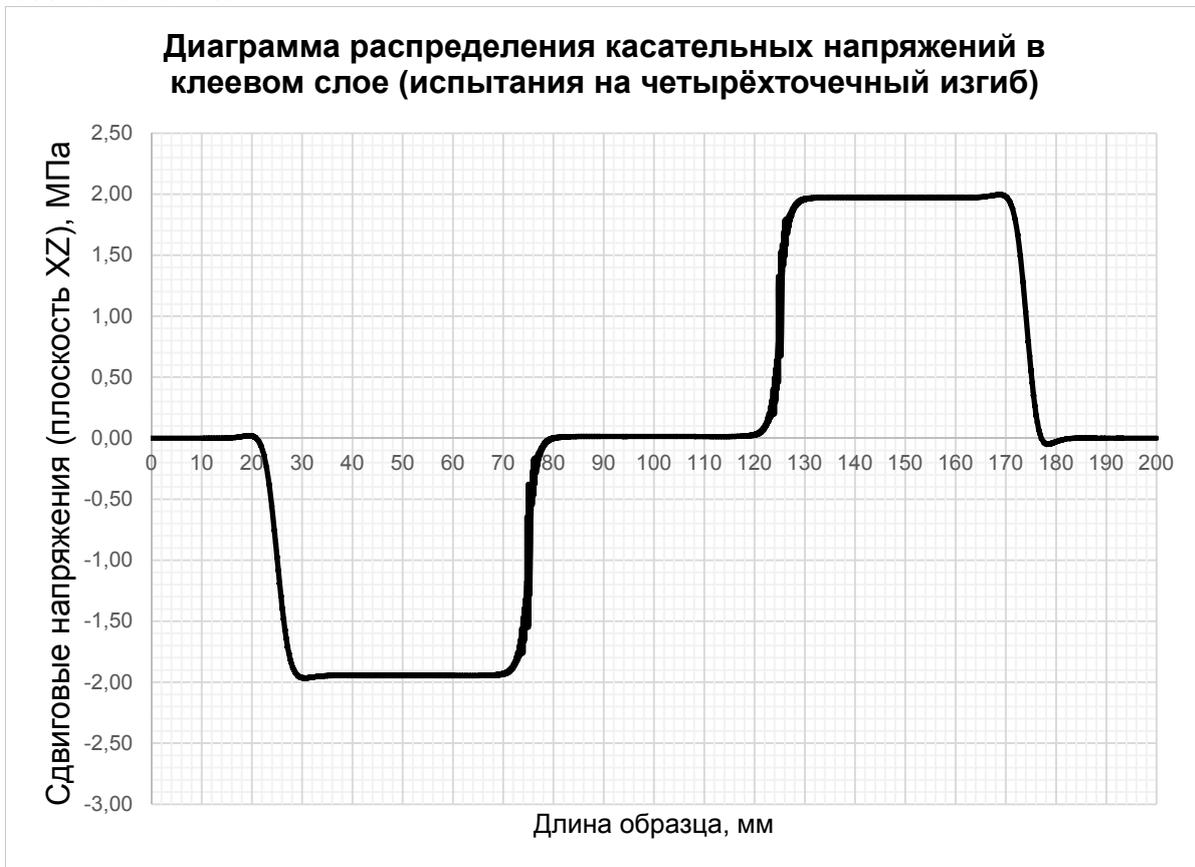


Рис. 6. Результаты расчёта образца трёхслойной конструкции для испытания на сдвиг:  
 а – схема нагружения;  
 б – касательные напряжения  $\tau_{xz}$  в заполнителе, МПа (масштабный коэффициент – 10);  
 в – нормальные напряжения в заполнителе, МПа (масштабный коэффициент – 10)

На рис. 7, а и б показаны картины распределения касательных напряжений в зоне контактного взаимодействия несущих слоёв и полимерного сотового заполнителя – клеевом слое – в моделях образцов для испытаний на четырёхточечный изгиб и сдвиг соответственно.



а



б

Рис. 7. Картина распределения касательных напряжений в клеевом слое: а – в модели образца для испытания на изгиб; б – в модели образца для испытания на сдвиг

Полученные результаты математического моделирования образцов для испытаний показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

### **Заключение**

Из сопоставления результатов испытаний и математического моделирования следует, что наиболее достоверные данные о величине касательных напряжений дают испытания на сдвиг. При этом полученная величина предельных касательных напряжений в этом случае на 20% ниже, чем при испытаниях на изгиб. Эту разницу можно объяснить тем, что в испытаниях на изгиб длинной балки под нагружающим элементом присутствуют сжимающие напряжения в зоне контакта несущих слоёв и сотового заполнителя. В испытаниях на сдвиг в зоне контактного взаимодействия помимо касательных напряжений действуют растягивающие напряжения в трансверсальном направлении, из-за чего создаются предпосылки к отслаиванию обшивок.

Испытания на сдвиг по стандарту С297 при кажущейся простоте осложнены тем обстоятельством, что концентрация напряжений имеет место и в клеевом слое между внешней поверхностью несущих слоёв образцов трёхслойных панелей и массивными металлическими накладками, что требует тщательной механической обработок поверхностей и подбора высокопрочных клеев. Следует также отметить, что при испытаниях на сдвиг при повышенной и пониженной температурах концентрация напряжений усиливается из-за проявления существенной разности коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР) металла и полимеров, что может существенно осложнить испытания.

Поэтому для практических целей можно рекомендовать использовать простой и информативный, приближенный к реальным условиям эксплуатации панелей пола, способ испытаний на изгиб длинной балки. С учётом проведённого исследования в проектировочных расчётах целесообразно умножать полученные экспериментальные значения предельной сдвиговой прочности сотового заполнителя  $[\tau_{xz}]$  на коэффициент 0,8.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту FSSS-2020-0016.

### **Библиографический список**

1. Комаров В.А., Куцевич К.Е., Павлова С.А., Тюменева Т.Ю. Оптимизация трёхслойных сотовых панелей пола из полимерных композиционных материалов пониженной горючести на основе высокопрочных углеродных и стеклянных волокон и клеевого связующего // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 3. С. 51-72. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-51-72
2. Шершак В.П., Шокин Г.И., Егоров В.Н. Технологические особенности производства трёхслойных сотовых панелей пола воздушных судов // Авиационная промышленность. 2014. № 3. С. 34-42.
3. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19, № 4 (2). С. 198-213.
4. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трёхслойных панелей //

Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 26-30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30

5. Куцевич К.Е., Деменьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). С. 52-59. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7

6. Шокин Г.И., Шершак П.В., Андриянова М.А. Опыт разработки и освоения производства сотовых панелей пола ЛА из отечественных материалов // Авиационная промышленность. 2017. № 1. С. 32-39.

7. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Когтёнков А.С. Новые разработки в области клеящих материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 452-459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459

8. ASTM C297 / C297M-16. Standard test method for flatwise tensile strength of sandwich constructions. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/C0297\_C0297M-16

9. ASTM C365 / C365M-16. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/C0365\_C0365M-16

10. ASTM C393 / C393M-20. Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0393\_C0393M-20

11. ASTM C273 / C273M-20. Standard test method for shear properties of sandwich core materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0273\_C0273M-20

## ANALYSIS OF CONTACT INTERACTION OF POLYMER HONEYCOMB CORE AND CFRP BASE LAYERS IN SANDWICH-CORE CONSTRUCTIONS

© 2021

**S. A. Pavlova** Engineer of the Research and Educational Center for Aircraft Construction; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [pavlova-sva@yandex.ru](mailto:pavlova-sva@yandex.ru)

The article considers the challenge of studying the mechanical properties of composite sandwich constructions at the interface between the base layers and the lightweight core. The results of strength tests are presented for specimens of sandwich-core panels with coats made of high-strength carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) and polymer honeycomb core considering various loading conditions. It is noted that a discrepancy in the values of shear stresses occurs in four-point bending and shear tests due to the complex stress-strain state of the specimens during bending. In order to interpret the experimental data, numerical analysis of the area of contact interaction between the coats and the filler of the sandwich-core composite structures is carried out. It is noted that in the presence of significant normal stresses in the adhesive coat the base layers separate from the core during shear tests and there is underestimation of the values of shear stresses by about 20%. Recommendations for the assignment of ultimate shear stresses for the use in practical design of sandwich-core composite constructions are put forward.

*Sandwich-core constructions; composite materials; tests; mathematical modeling; shear stresses; limiting characteristics*

---

**Citation:** Pavlova S.A. Analysis of contact interaction of polymer honeycomb core and CFRP base layers in sandwich-core constructions. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 1. P. 87-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-87-96

## References

1. Komarov V.A., Kutsevich K.E., Pavlova S.A., Tyumeneva T.Yu. Optimization of honeycomb sandwich floor panels made of polymer-matrix low-combustible composite materials based on high-strength carbon and glass fibers and adhesive binder. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 3. P. 51-72. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-51-72
2. Shershak V.P., Shokin G.I., Egorov V.N. Technological characteristics of the fabrication of the aircraft floor sandwich honeycomb panels. *Aviation Industry*. 2014. No. 3. P. 34-42. (In Russ.)
3. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the issue of production of the floor panels made of PCM for aircraft (review article). *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2017. V. 19, no. 4 (2). P. 198-213. (In Russ.)
4. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviation Materials and Technologies*. 2018. No. 4 (53). P. 26-30. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30
5. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *Trudy VIAM*. 2016. No. 8 (44). P. 52-59. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7
6. Shokin G.I., Shershak P.V., Andriunina M.A. Experience in development and manufacture of honeycomb floor panels made of domestic materials. *Aviation Industry*. 2017. No. 1. P. 32-39. (In Russ.)
7. Lukina N.F., Petrova A.P., Muhametov R.R., Kogtyonkov A.S. New developments in the field of adhesive aviation materials. *Aviation Materials and Technologies*. 2017. No. S. P. 452-459. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459
8. ASTM C297 / C297M-16. Standard test method for flatwise tensile strength of sandwich constructions. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/C0297\_C0297M-16
9. ASTM C365 / C365M-16. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/C0365\_C0365M-16
10. ASTM C393 / C393M-20. Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0393\_C0393M-20
11. ASTM C273 / C273M-20. Standard test method for shear properties of sandwich core materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0273\_C0273M-20