

А. А. Адамов<sup>1</sup>, А. В. Торопицина<sup>2</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СДВИГ

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

**Аннотация.** В работе выполнено экспериментальное определение эффективных модулей сдвига и пределов прочности при испытаниях на сдвиг плоских многослойных сотовых панелей с тонкими обшивками из углепластиков и заполнителем из стеклопластиковой ленты. Выявлено статистически значимое различие эффективных модулей сдвига вдоль и поперек плоскостей склейки ленты в ячейках сот, их обратная корреляция с общей высотой сотового заполнителя. Эффективные пределы прочности на сдвиг статистически не различаются и не зависят от общей высоты сот. На конечно-элементных моделях выполнен численный анализ факторов, влияющих на занижение расчетных значений эффективных модулей сдвига.

**Ключевые слова:** многослойные сотовые панели, упругие и прочностные характеристики, сдвиг, конечно-элементная модель

DOI: 10.37972/chgpu.2023.56.2.008

УДК: 620.178.6+629.7.023

### Введение

Многослойные конструкции с чередующимися слоями силовых обшивок и слоями сотового композиционного или металлического заполнителя различной конфигурации широко применяются в различных отраслях промышленности: в самолетостроении,

---

© Адамов А. А., Торопицина А. В., 2023

Адамов Анатолий Арсангалеевич

e-mail: adamov@icmm.ru, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия.

Торопицина Анна Владимировна

e-mail: togoritsina@avid.ru, заместитель начальника отдела, АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия.

Поступила 16.11.2023

двигателестроении, судостроении, аэрокосмической технике, строительстве и т.д. благодаря сочетанию высокой изгибной жесткости и низкой удельной плотности. Использование сотовых полимерных композиционных материалов в конструкции мотогондолы авиадвигателя позволяет также значительно снизить уровень его шума. Простейшими из сотовых конструкций являются трехслойные элементы с двумя наружными тонкими силовыми обшивками (в виде пластинок или оболочек) и внутренним слоем сотового заполнителя. За счет разнесенных обшивок такой пакет дает более высокие характеристики жесткости и прочности при относительно малом весе. Элементы конструкций с сотовым заполнителем в основном работают на изгиб, сдвиг, сжатие по нормали к обшивкам и растяжение-сжатие в плоскости обшивок.

Широкое применение ответственных конструкций с заполнителем шестигранной сотовой структуры вызывает необходимость отработки и верификации методов численного анализа разнообразных элементов конструкций с сотовыми заполнителями, отличающимися параметрами обшивок, рядностью и высотой сот, их материалом и т.д. При расчетах таких конструкций обычно используют эффективные (усредненные) характеристики жесткости и прочности реальной сотовой структуры, заменяемой сплошной однородной анизотропной средой. Многими авторами предложены различные структурные подходы для определения эффективных характеристик [1], [2], [3], которые в основном сводятся к расчету взаимных смещений под нагрузкой методами строительной механики, энергетическими методами в предположении упругой работы конструкции. В [4] получены аналитические формулы для определения усредненных упругих и прочностных характеристик сотового заполнителя, основанные на введении предположения о безмоментной работе пластинок сот в процессе нагружения и на поэтапном их исключении из работы после потери устойчивости в условиях или двухстороннего сжатия, или чистого сдвига. В формулах введены безразмерные коэффициенты, которые определяются из данных экспериментов на растяжение, сжатие и чистый сдвиг в двух плоскостях. Детальный анализ по определению эффективных характеристик заполнителей содержится, например, в работах [5], [6], [7], [8].

Комплекс экспериментально определяемых механических параметров многослойных конструкций с сотовыми заполнителями получают чаще всего при испытаниях плоских образцов-панелей, минимальные размеры которых определяются стандартами на испытания из соображений представительности образца с эффективными свойствами, усредненными по его объему:

– эффективные модули сдвига упругого ортотропного тела  $G_{xz}, G_{yz}$  (в декартовой системе координат  $x, y, z$ , ось  $z$  направлена по нормали к плоскости обшивок), которые зависят от жесткости на сдвиг пластинок-элементов сот (испытания образцов на сдвиг сотового заполнителя по стандарту ASTM C273 [9]);

– эффективный модуль упругости заполнителя  $E_z$ , который зависит от геометрических особенностей сотового заполнителя.

Модуль сдвига  $G_{xy}$  и модули  $E_x, E_y$  сотового заполнителя с тонкими стенками обычно пренебрежимо малы и определяются только для специальных задач.

Стандартные способы оценки характеристик сдвига и сжатия заполнителя позволяют получить экспериментальные данные, которые необходимы для разработки технических условий на материал, проектирования конструкций с сотовым заполнителем, научных исследований и разработок, контроля качества.

Представленная работа посвящена экспериментальному определению эффективных модулей сдвига  $G_{xz}, G_{yz}$  упругого ортотропного тела и соответствующих пределов прочности для многослойных сотовых панелей с тонкими обшивками из углепластиков и наполнителем в виде шестигранных сот из стеклопластиковой ленты, статистической интерпретации полученных результатов, численному анализу различных значимых факторов, определяющих достоверность и точность экспериментальных данных.

#### **Методика экспериментального определения основных эффективных характеристик сотового заполнителя при сдвиге**

Метод испытаний образцов на сдвиг сотового заполнителя ASTM C273 позволяет определять предел прочности при сдвиге параллельно плоскости обшивок образца с сотовым заполнителем и модуль сдвига в плоскости действия нагрузки. При выборе длины нагружающих пластин испытательной оснастки и назначении областей приклейки к ним образцов сотового заполнителя разной высоты учитывалось существенное требование методики — линия действия продольной нагрузки растяжения проходит через диагонально противоположные углы образца с сотовым заполнителем.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick Z100SN5A, оснащенной штатным длинноходовым датчиком Multisens для измерения осевой деформации и штатным ручным датчиком DMS для измерения поперечной деформации при растяжении-сжатии образцов. Для проведения экспериментальных работ по определению модулей сдвига сотового заполнителя использовалась типовая оснастка WTF-TS-35 (фирмы Wyoming Test Fixtures, Inc) для испытаний по ASTM C 273 (рис. 1).

Определение модуля сдвига обуславливает необходимость измерения малого относительного смещения (сдвига) нагружающих приклеенных пластин относительно друг друга. Большая нелинейная податливость нагруженных элементов оснастки не позволяет надежно определять величину сдвига по измерению относительного смещения цилиндрических шарниров оснастки с помощью экстензометра Multisens. Поэтому для измерения величины сдвига был использован датчик поперечных деформаций DMS с диапазоном измерения 4 мм, крепившийся специально разработанными и изготовленными крепежными элементами на нагружающих стальных пластинах в средней части образца. Контрольные бесконтактные измерения величин относительных смещений нагружающих пластин оснастки выполнены с помощью оптической системы Strain-Master 5 методом корреляции цифровых изображений в режиме визуального датчика 2D. При нагружении образца с сотовым заполнителем относительное расстояние между нагружающими пластинами изменялось до 0,02% на уровне погрешностей измерения, а сдвиговые деформации достигали 2,5%. Максимальное отличие относительного сдвига пластин оснастки, измеренного датчиком DMS и оптической системой, не превышало 5%.

Существенным фактором, повлиявшим на статистическую вариативность полученных результатов испытаний, оказалось несовершенство процедур приклейки сотовых образцов к стальным пластинам оснастки. Необходим специальный многоместный кондуктор, обеспечивающий реализацию допусков стандарта ASTM D5687 [10] по взаимной смещенности, соосности и параллельности образца с приклеенными пластинами. Испытание образца с не соосно приклеенными пластинами в испытательную

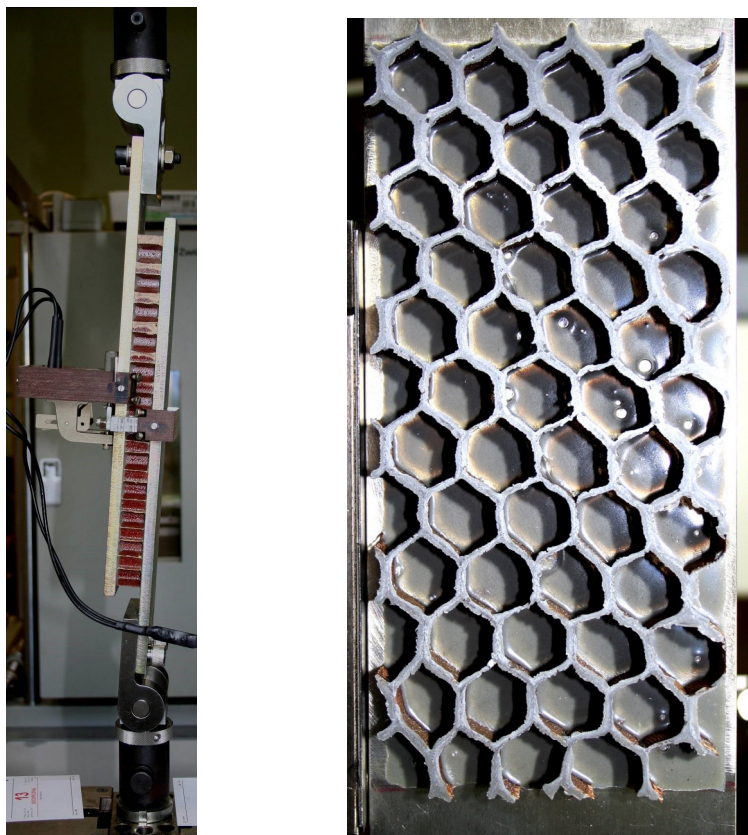


Рис. 1. Образец однорядного сотового заполнителя с оснасткой WTF-TS-35, датчиком DMS на испытательной машине Zwick Z100SN5A (слева), поверхность разрушения (справа).

оснастку приводит к внецентренному нагружению образца, а при не параллельности осей — к сложному продольно-поперечному сдвигу.

#### **Результаты экспериментальных исследований эффективных характеристик сотового заполнителя**

Проведены испытания на сдвиг 18 партий образцов с 1, 2 и 3 рядами сотового заполнителя различной высоты и общей высотой  $t$  заполнителя от 7,5 до 31 мм при нагружении вдоль и поперек плоскостей склейки (ПС). Они образуются в процессе изготовления заполнителя с шестигранными сотовыми ячейками при склеивании периодически гофрированных тонких лент стеклопластика. Выбрав ось  $x$  вдоль ПС, введем обозначения эффективных модулей сдвига заполнителя: вдоль плоскости склейки —  $G_{xz}$ , поперек плоскости склейки —  $G_{yz}$ . Соответственно обозначим пределы прочности на сдвиг:  $\tau_{xz}^e$ ,  $\tau_{yz}^e$ .

Ниже приведены совмещенные гистограммы значений относительных (к среднему значению  $G_{xz}$ ) модулей сдвига и относительных (к среднему значению  $\tau_{xz}^e$ ) пределов прочности при сдвиге заполнителя (рис. 2). На гистограммах значений относительного модуля сдвига (см. рис. 2) видно статистически значимое различие экспериментально найденных эффективных модулей сдвига вдоль и поперек плоскости склейки

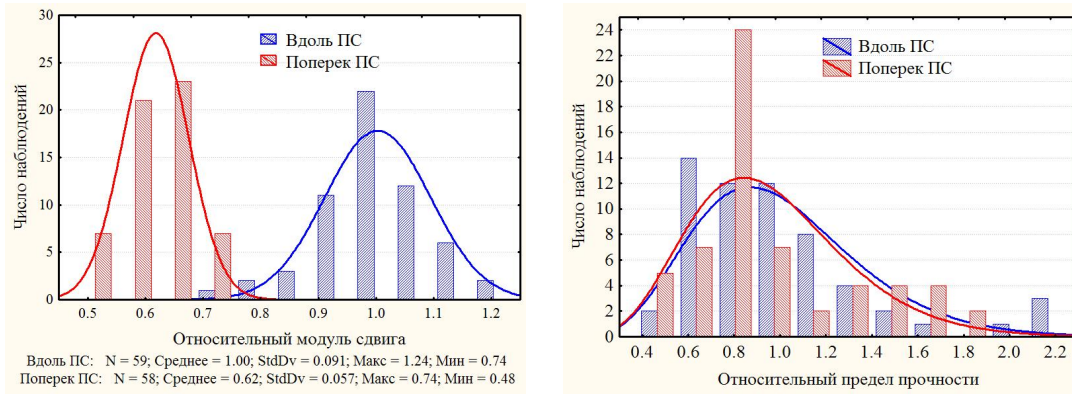


Рис. 2. Гистограммы значений относительных модулей сдвига заполнителя  $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$  (слева) и относительных пределов прочности при сдвиге  $\tau_{xz}^e$ ,  $\tau_{yz}^e$  (справа).

заполнителя, в среднем их отношение

$$\frac{G_{xz}}{G_{yz}} = \frac{1,00}{0,62} = 1,61.$$

Пределы прочности на сдвиг в этих направлениях нагружения (см. рис. 2) статистически значимо не различаются.

Аналитически эффективные модули сдвига сотового заполнителя находят по формулам [11]:

$$G_{xz} = G_{c3} \frac{\delta_3}{l} \zeta, \quad G_{yz} = 0,576 G_{c3} \frac{\delta_3}{l}, \quad (1)$$

где  $G_{c3}$  — модуль упругости стенки соты заполнителя,  $l$  — толщина стенки соты заполнителя,  $\delta_3$  — длина стороны ячейки сотового заполнителя,  $\zeta$  — коэффициент, который определяют по графику [11] (стр. 257, рис. 5), для испытанных образцов  $\zeta = 0,877$ .

Отношение модулей из (1) определяется величиной

$$\frac{G_{xz}}{G_{yz}} = \frac{\zeta}{0,576} = \frac{0,877}{0,576} = 1,523,$$

что отличается от найденного экспериментального соотношения по средним значениям модулей менее, чем на 6%.

В табл. 1 при доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  приведены линейные коэффициенты корреляции  $r$  значений относительных эффективных модулей сдвига заполнителя  $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$  относительных пределов прочности при сдвиге  $\tau_{xz}^e$ ,  $G_{yz}^e$  и общей высоты сотового заполнителя  $t$ .

Таблица 1. Коэффициенты корреляции  $r$  относительных эффективных модулей сдвига сотового заполнителя, пределов прочности при сдвиге и общей высоты сотового заполнителя

Величина	$G_{xz}$	$G_{yz}$	$\tau_{xz}^e$	$\tau_{yz}^e$
$r$	0,17	0,14	-0,77	-0,87

Отсутствие значимых корреляций эффективных модулей сдвига в обоих направлениях и общей высоты разнорядных сот оправдывает отсутствие таковой зависимости в формулах (1).

Пределы прочности уменьшаются с ростом общей высоты сотовых рядов, их корреляции существенно значимы. Эта статистическая зависимость объясняется характерным механизмом разрушения сотового заполнителя путем предварительной потерей устойчивости элементарных пластинок сотовой структуры при сжимающих и сдвиговых нагрузках [1], [2], [3], [4], [5] для всех высот сотового заполнителя с расположением плоскостей склейки заполнителя вдоль и поперек плоскости нагружения образца.

#### **Численное определение эффективных характеристик однорядного сотового заполнителя**

*Явное конечно-элементное моделирование оснастки и всех сотовых ячеек с учетом одной оси симметрии рассматриваемой конструкции*

При построении конечно-элементной модели (КЭМ) сотового заполнителя использовались 8-ми узловые оболочечные элементы SHELL281, которые позволяют моделировать слоистую структуру композиционных материалов. Для моделирования нагружающих пластин и нагружающих элементов оснастки использовались конечные элементы SOLID186, при этом шарниры смоделированы как жесткие цилиндрические контактные элементы со стандартными параметрами. При задании слоев сотового заполнителя учитывались двойные слои в плоскости склейки сотового заполнителя, стеклопластиковые соты соединены со стальными пластинами оснастки при помощи контактных элементов, тип контакта bonded (always). Моделирование выполнено для образцов на сдвиг с расположением плоскостей склейки вдоль и поперек плоскости нагружения образца.

Расчетные относительные перемещения нагружающих пластин друг относительно друга определялись в тех же местах, где снимались экспериментальные данные перемещений при испытании образцов на сдвиг. В условиях испытаний датчик смещения установлен таким образом, чтобы он измерял относительное смещение между двумя стальными нагружающими пластинами. Точка контакта, в которой измерялось относительное перемещение между нагружающими пластинами, расположена в центре по длине материала заполнителя.

При растяжении образца в оснастке происходит сдвиг нагружающих пластин относительно друг друга и объект испытаний, сохраняя силовую линию, по которой идет нагружение, подвержен изгибу по менее жестким местам. Такими местами являются свободные части нагружающих пластин, которые не находятся в контакте с заполнителем и соединительными элементами (рис. 3). Деформация нагружающих пластин в ходе проведения испытаний была ожидаема и подтвердилась экспериментальным и расчетным способами. На поверхностях приклейки сотового заполнителя к нагружающим пластинам возникают усилия сдвига и отрыва, распределенные неравномерно. Максимальные нормальные напряжения отрыва достигают 10% от напряжений сдвига в торцевых зонах.

Модуль сдвига согласно ASTM C273 определяется для каждого образца по экспериментальной диаграмме «сила сдвига – относительный сдвиг между пластинами оснастки» ( $P-u$ ):

$$G^{exp} = \frac{\Delta P}{\Delta u} \frac{t}{Lb}, \quad (2)$$

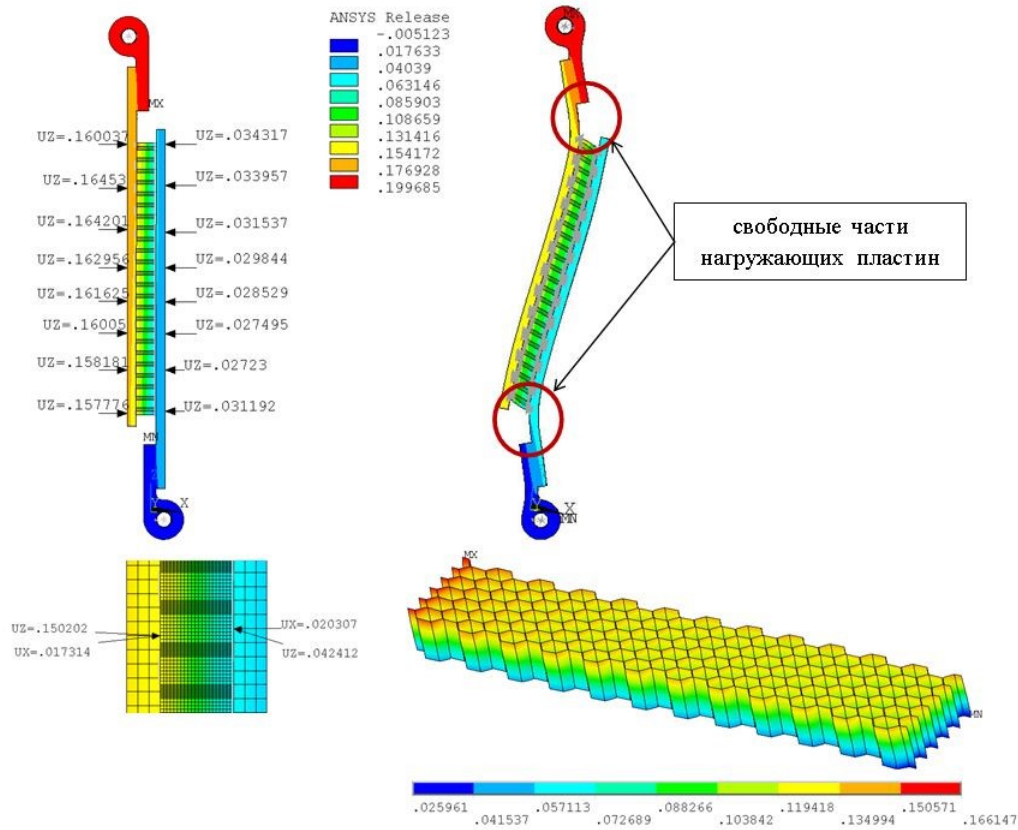


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние образца с расположением плоскостей склейки заполнителя вдоль плоскости нагружения образца.

где  $\Delta P$  — приращение нагрузки на участке, где определяется модуль,  $\Delta u$  — приращение относительное перемещение на участке, где определяется модуль;  $t$  — высота заполнителя,  $L$  — длина образца,  $b$  — ширина образца. По результатам испытаний 10 образцов из двух партий ( $L = 288$  мм,  $b = 76,2$  мм,  $t = 21,03 \pm 0,08$  мм) в каждой был определен относительный модуль сдвига

$$G_{xz}^{exp} = 1,00 \pm 0,09.$$

При численном анализе такого образца определена расчетная диаграмма «сила сдвига – относительный сдвиг» и по (2) вычислен расчетный относительный эффективный модуль сдвига для сотового заполнителя с расположением плоскостей склейки вдоль плоскости нагружения образца

$$G_{xz}^{sol} = \frac{\Delta P}{\Delta u} \frac{21,0}{288 \cdot 76,2} \approx 0,67.$$

Получено неудовлетворительное согласование с экспериментом, отличие по среднему значению составляет 33%.

Моделирование этого же образца без учета податливости нагружающих пластин и других металлических деталей оснастки позволило получить более точную оценку

$G_{xz}^{sol} = 0,83$ , что на 17% отличается от экспериментального значения и свидетельствует о возможных погрешностях численной модели образца с податливой металлической оснасткой.

*Определение эффективных характеристик сотового заполнителя с использованием ячейки периодичности*

Подход к определению эффективных характеристик сотового заполнителя был рассмотрен многими авторами на основе различных структурных подходов [1], [4], [5] и др. Например, в работе [12] проведен анализ определяемых эффективных характеристик сотового заполнителя с использованием различных способов моделирования в сравнении с экспериментальными данными. Рассмотрены структурные модели сотового заполнителя на основе упрощающих гипотез и модель на основе конечных элементов (КЭ). В [12] получено приемлемое совпадение расчетных значений модуля сдвига для всех применяемых методик расчета. При этом наиболее близкие значения получены при использовании КЭМ, но они выше экспериментальных данных. Высказано предположение: в расчетах используется идеально правильная форма соты, а в реальности (в эксперименте) наблюдается наличие начальной погиби ребристых элементов сот, что сказывается на понижении жесткости реального сотового заполнителя.

В [13] выполнено сравнение результатов с использованием метода прямого конечно – элементного моделирования в пакете ANSYS и по аналитическим зависимостям. При этом отмечено, что структурные модели сотового заполнителя на основе упрощающих гипотез, в отличие от КЭМ, дают существенно завышенные результаты для  $E_x, E_y, G_{xy}$ .

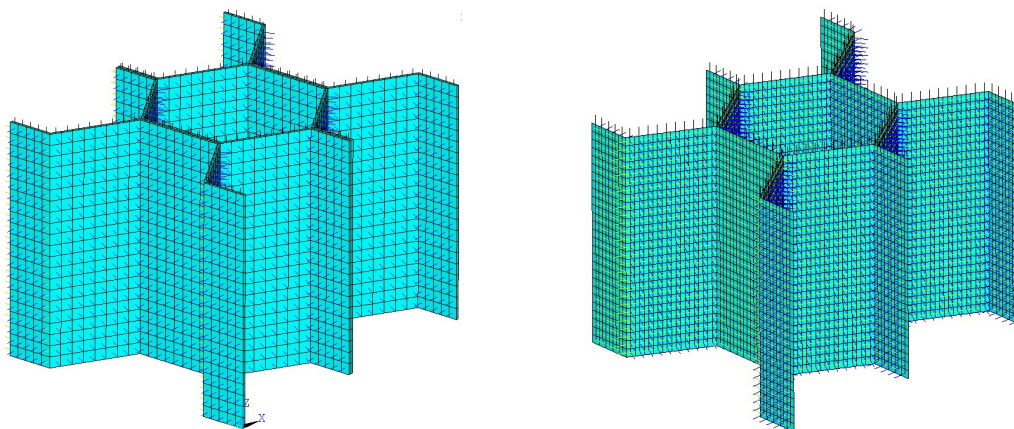


Рис. 4. КЭМ структурной ячейки сотового заполнителя высотой 21 мм: объемные элементы SOLID186 (слева), оболочечные элементы SHELL281 (справа).

В настоящей работе для определения эффективных характеристик сотового заполнителя выбрана ячейка периодичности, квадратной (в плане) формы (минимальный объем материала, в котором содержится достаточное для описания состояния тела число «носителей» механизмов процесса деформирования), показанная на рис. 1 с



двумя вариантами сетки использованных КЭ. При расчетах выполнен анализ сходимости от параметров сетки, а также анализ влияния способа закрепления по местам торцевого контакта (обшивки не моделировались).

Для определения эффективных характеристик применялся метод прямого конечно-элементного моделирования в пакете ANSYS. Проводились численные эксперименты на растяжения вдоль осей  $x, y, z$  и сдвиг в плоскостях  $xy, xz, yz$  (расчетная модель состоит из нескольких ячеек периодичности). Из численных экспериментов находились средние напряжения и деформации, а затем вычислялись эффективные характеристики с использованием закона Гука. Полученные значения относительных эффективных модулей сдвига для сотового заполнителя по результатам расчета структурных ячеек приведены в табл. 2.

Результаты расчета эффективных характеристик сотового заполнителя для структурной ячейки при различном способе моделирования показали хорошую сходимость результатов между собой и с результатами расчета образца при абсолютно жестких нагружающих пластинах, но все они дают заниженные значения искомых модулей.

Для выяснения факторов, влияющих на заниженную численную оценку жёсткостных характеристик сот, рассмотрено наличие клеевых наплывов (рис. 1) по торцевым поверхностям сотового заполнителя.

На КЭМ структурной ячейки с КЭ SOLID186 выполнен численный анализ влияния клеевых наплывов и модуля упругости клея на значение эффективного модуля сдвига сотового заполнителя вдоль плоскости склейки. При оценке влияния высоты клеевого наплыва на значение эффективного модуля сдвига сотового заполнителя клей моделировался в виде параллелепипеда с квадратным сечением. Результаты анализа приведены на рис. 5, из них следует, что незначительное изменение высоты клеевых наплывов может привести к значительному изменению эффективного модуля сдвига сотового заполнителя.

Дополнительными выявленными факторами, приводящими к увеличению статистических разбросов экспериментальных данных, являются:

- клеевые наплывы различной высоты;
- отклонения технологических процессов изготовления, хранения и отверждения клея.

Использованные при расчетах деформации структурных ячеек характеристики стеклопластиковой тонкой ленты сот нами экспериментально не определялись, поэтому на КЭМ структурной ячейки с КЭ SHELL281 выполнена численная оценка

Таблица 2. Результаты различного численного моделирования относительных эффективных модулей сдвига сотового заполнителя

Модуль сдвига	Расчет, КЭМ ячейки SOLID186	Расчет, КЭМ ячейки SHELL281	Расчет, КЭМ ячейки - жесткие пластины	Эксперимент
$G'_{xz}$ (вдоль ПС)	0,827	0,850	0,830	1,00
$G'_{yz}$ (поперек ПС)	0,543	0,544	0,543	0,62

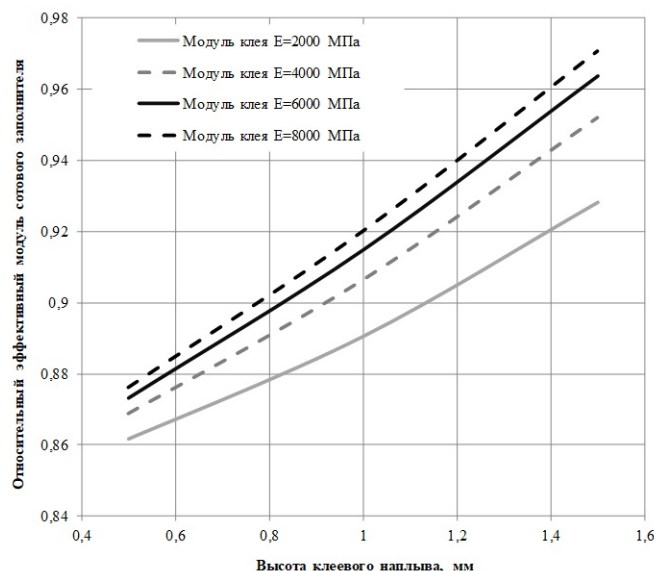


Рис. 5. Анализ влияния клеевых наплывов и модуля упругости клея на значение эффективного модуля сдвига сотового заполнителя.

влияния свойств материала сот на эффективный модуль сдвига сотового заполнителя. Она показала ожидаемое линейное влияние вариаций модуля сдвига в плоскости ленты стеклопластика на вариации эффективного модуля сотового заполнителя.

### Заключение

При испытании на сдвиг образцов с разной высотой сотового заполнителя получены две четко выделенные группы образцов, которые делятся по способу расположения плоскостей склейки заполнителя вдоль или поперек плоскости нагружения. Результаты эксперимента хорошо согласуются с данными, приведенными в [1], [11]. Полученные модули сдвига заполнителя статистически значимо не зависят от высоты сотового заполнителя.

По результатам эксперимента получены большие статистические разбросы данных, обусловленных, в основном, несовершенством различных этапов процедур приклейки сотовых образцов к стальным пластинам оснастки.

При нагружении образца сотового заполнителя сдвиговой нагрузкой в штатной оснастке по ASTM C 273 на поверхностях приклейки заполнителя к нагружающим пластинам кроме усилий сдвига возникают также усилия отрыва, распределенные неравномерно. Максимальные нормальные напряжения отрыва достигают 10% от напряжений сдвига в торцевых зонах.

Расчетное определение эффективных модулей сдвига сотового заполнителя путем численного анализа в пакете ANSYS конечно-элементных модели образца на сдвиг с явным моделированием сотовых ячеек и двух типов КЭ-моделей ячейки периодичности дает заниженные на 17 – 33% значения модулей сдвига по отношению к экспериментально определенным усредненным величинам.

Численный анализ учета клеевых наплывов разной высоты и модуля упругости клея для приклейки сотового заполнителя к обшивкам панелей, вариации модуля

сдвига стекло-пластиковой ленты сот на значение эффективного модуля сдвига сотового заполнителя показал значимость этих факторов на занижение расчетных значений эффективных модулей сдвига сотового заполнителя.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Расчет трехслойных панелей / А.Я. Александров, Л.Э. Брюккер, Л.М. Куршин [и др.]. Москва: Оборонгиз, 1960. 271 с.
- [2] Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. Москва: Машиностроение, 1975. 296 с.
- [3] Noor A., Burton W., Bert C. Computational models for sandwich panels and shells // Applied Mechanics Reviews. 1996. no. 3 (49). P. 155–199.
- [4] Брюккер Л.Э., Ракин А.С. Испытания трехслойных стержней при нормальных и повышенных температурах // Динамика и прочность авиационных конструкций: Межвуз. сб. научн. трудов. Новосибирск, 1978. № 4. С. 73–79.
- [5] Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. Москва: Машиностроение, 1980. 375 с.
- [6] Ендогур А.И., abd К.М. Иерусалимский М.В. Вайнберг. Сотовые конструкции. Москва: Машиностроение, 1986. 200 с.
- [7] Теоретико-экспериментальный метод определения усредненных упругих и про-странственных характеристик сотового заполнителя трехслойных конструкций / Н.И. Акишев, И.И. Закиров, В.Н. Паймушин [и др.] // Механика композитных материалов. 2011. № 4 (47). с. 543–556.
- [8] Усредненные упругие и прочностные характеристики сотового заполнителя и теоретико-экспериментальный метод их определения / В.Н. Паймушин, И.И. Закиров, С.А. Луканкин [и др.] // Механика композитных материалов. 2012. № 5 (48). с. 745–764.
- [9] ASTM C273/C273M - 11. Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials. ASTM International. 2017. 7.
- [10] ASTM D5687/D5687M - 95. Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guide-lines for Specimen Preparation. ASTM International. 2017. 15.
- [11] Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Т.2. Москва: Машиностроение, 1968. 464 с.
- [12] Щербатюк Д.А., Янковский А.П. Верификация структурных моделей пространственно-армированных пенопластмасс и сотовых заполнителей сэндвич-панелей на основе проведения численных экспериментов // Теоретическая и прикладная механика. Выпуск 28 / под ред. А.В. Чигарев. Минск: БНТУ, 1968. С. 322–327.
- [13] Карпинский Д.М. Композитные материалы: справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

A. A. Adamov<sup>1</sup>, A. V. Toropitsina<sup>2</sup>

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF DEFORMATION OF MULTILAYER HONEYCOMB PANELS DURING SHEAR TEST

<sup>1</sup> *Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS, Perm, Russia*

<sup>2</sup> *JSC "ODK-Aviadvigatel", Perm, Russia .*

**Abstract.** The paper presents an experimental determination of effective shear modulus and strength limits during shear tests of flat multilayer honeycomb panels with thin carbon fiber sheaths and fiberglass tape filler. A statistically significant difference in the effective shear modules along and across the tape bonding planes in the cells of the honeycomb, their inverse correlation with the total height of the honeycomb filler, was revealed. The effective shear strength limits do not differ statistically and do not depend on the total height of the honeycomb. Numerical analysis of the factors influencing the underestimation of the calculated values of the effective shear modules is performed on finite element models.

**Keywords:** multilayered honeycomb panels, elastic and strength characteristics, finite element model

### REFERENCES

- [1] Calculation of sandwich panels / A. Aleksandrov, L. Brucker, L. Kurshin et al. Moscow: Oborongiz, 1960. 271 p. (in Russian).
- [2] Bersudsky V., Krysin V., Lesnykh S. Manufacturing technology of cellular aircraft structures. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 296 p. (in Russian).
- [3] Noor A., Burton W., Bert C. Computational models for sandwich panels and shells // Applied Mechanics Reviews. 1996. no. 3 (49). P. 155–199.
- [4] Brucker L., Rakin A. Testing of three-layer rods under normal and elevated temperatures // Dynamics and Strength of Aircraft Structures. Novosibirsk, 1978. no. 4. P. 73–79. (in Russian).
- [5] Bolotin V., Novichkov Y. Mechanics of multilayer structures. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 375 p. (in Russian).
- [6] Endogur A., Wainberg M., Jerusalimskiy K. Cell structures. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 200 p. (in Russian).
- [7] Theoretical and experimental method for determination of averaged elastic and spatial characteristics of honeycomb filler of three-layer structures / N. Akishev, I. Zakirov, V. Paymushin et al. // Mechanics of Composite Materials. 2011. no. 4 (47). p. 543–556.
- [8] Theoretical and experimental method for determination of averaged elastic and spatial characteristics of honeycomb filler of three-layer structures / V. Paimushin, I. Zakirov, S. Lukankin et al. // Mechanics of Composite Materials. 2012. no. 5 (48). p. 745–764.
- [9] ASTM C273/C273M - 11. Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials. ASTM International. 2017. 7.
- [10] ASTM D5687/D5687M - 95. Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation. ASTM International. 2017. 15.
- [11] Strength, stability, oscillations. Handbook. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 1968. 464 p. (in Russian).
- [12] Shcherbatyuk D., Yankovsky A. Verification of structural models of spatially reinforced foam plastics and honeycomb sandwich panels based on numerical experiments // Theoretical and Applied Mechanics. Issue 28 / Ed. by A. Chigarev. Minsk: BNTU, 1968. P. 322–327. (in Russian).
- [13] Karpinsky D. Composite materials: Handbook. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 592 p. (in Russian).

---

*Adamov Anatoliy Arsangaleevich*, Dr. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Leading Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS, Perm, Russia.

*Toropitsina Anna Vladimirovna*, Deputy Head of the Department, JSC "ODK-Aviadvigatel", Perm, Russia.