

УДК 629.7.023

**В. И. Сливинский, М. Е. Харченко, А. Ф. Санин, В. И. Липовский**

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ**

*Представлено результати відпрацювання чотирьох методів відкритого формування дисперсно-наповнених епоксидних композитів, призначених для розробки засобів ізоляції радіоактивних матеріалів. Досліджено рівномірність розподілення важкої фракції наповнювача в епоксидному зв'язувачі на мікро- та макрорівні. Запропоновано методи формування зразків композиту для подальших досліджень його експлуатаційних властивостей.*

**Ключові слова:** епоксидний композит, метод формування, дисперсний наповнювач, рівномірність розподілення

Одним из приоритетных направлений для выбора рациональной конструктивно-силовой схемы изделий современной аэрокосмической техники является применение трехслойных сотовых конструкций (СК), элементы которых состоят из двух несущих слоев и сотового заполнителя (СЗ).

В настоящее время все шире используются обшивки и соты на основе углеродного наполнителя, что позволяет в значительной степени повысить прочность, жесткость конструкций и увеличить ресурс их работы.

СЗ на основе углеродного наполнителя — углесотопласт (УСП):

- имеет максимальные абсолютные и удельные показатели прочности и жесткости при сдвиге и сжатии;
- обладает минимальным коэффициентом линейного расширения;
- в сочетании с углепластиковыми обшивками позволяет создать химически однородные размеростабильные конструкции, которые широко применяются в аэрокосмической технике (рефлектора, антенны).

Известно, что основными механическими характеристиками заполнителя УСП являются модуль упругости в направлении, перпендикулярном несущим слоям —  $E_z$  и модули сдвига в плоскостях граней сотов параллельно и перпендикулярно клеевым полосам, соответственно —  $G_{xz}$  и  $G_{yz}$ . Величины остальных модулей упругости и сдвига пренебрежимо малы и в расчетах обычно не учитывают.

Определено, что схема армирования ( $\pm 45^\circ$ ) обеспечивает высокий уровень всех приведенных физико-механических характеристик (ФМХ) — модуля упругости и сдвига. [1]

---

© Сливінський Володимир Іванович, докт. техн. наук, головн. наук. співр. ВАТ "Український науково-дослідний інститут технології машинобудування"; Санін Анатолій Федорович, докт. техн. наук, професор Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара, Липовський Володимир Іванович, канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харченко Максим Євгенович, аспірант — співробітники цього ж університету.

Разработана блочная технология изготовления УСП с размером грани ячейки 5 мм.

Получен углесотопласт УСП-5,0 с объемной массой: 127,8 кг/м<sup>3</sup> из углеродной ленты ЭЛУР-П-А с толщиной монослоя 130 мкм пропитанной связующим ЭНФБ, схема армирования ( $\pm 45^\circ$ ); 41,0 кг/м<sup>3</sup> из углеродного жгута IMS-65, пропитанного связующим ЭНФБ с толщиной монослоя 20 мкм, схема армирования ( $+45^\circ$ ;  $-45^\circ$ ;  $-45^\circ$ ;  $+45^\circ$ ) [2].

Был проведен ряд комплексных испытаний ФМХ образцов углесотопласта УСП-5,0 с объемными массами 127,8 кг/м<sup>3</sup> и 41,0 кг/м<sup>3</sup> для определения ФМХ УСП. Полученные данные прочностных и жесткостных характеристик УСП в сравнении с ранее полученными результатами испытаний СЗ на основе алюминиевой фольги, представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Физико-механические характеристики СЗ на основе углеродных наполнителей и алюминиевой фольги**

Характеристики	Значение показателя для СЗ на основе			
	углеродного наполнителя УСП-5,0		алюминиевой фольги марки	
	IMS-65	ЭЛУР-П-А	АМг2Н-2,5-41П	АМг2-Н-3,5-20П
Объемная масса сотов, кг/м <sup>3</sup>	41,00	127,80	65,00	25,00
Размер грани ячейки, мм	5,00	5,00	2,50	3,50
Прочность при сжатии: абсолютная, МПа	2,26	11,80	2,77	0,61
Предел прочности при сдвиге параллельно клеевым полосам: абсолютный, МПа	2,36	4,97	1,81	0,43
Модуль упругости при сдвиге параллельно клеевым полосам: абсолютный, МПа	231,04	776,00	285,00	99,00
Предел прочности при сдвиге перпендикулярно клеевым полосам: абсолютный, МПа	1,32	3,83	1,08	0,30
Модуль упругости при сдвиге перпендикулярно клеевым полосам: абсолютный, МПа	169,75	378,40	160,00	56,00

Анализ представленных в таблице данных показывает, что самые высокие показатели прочности и жесткости имеет УСП.

Углепластиковый сотовый наполнитель является дорогостоящим материалом, еще более дорогостоящими являются натурные испытания изделий из углепластикового СЗ. Однако существуют программные системы конечно-элементного анализа, позволяющие проводить моделирование, анализ и решение пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций, что, в свою очередь, позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа “изготовление — натурное испытание”.

Учитывая выше сказанное, целесообразным является использование программного комплекса метода конечных элементов (МКЭ) для проведения се-

рии численных экспериментов, имитирующих натурные испытания модели образца углеродного наполнителя УСП-5,0 с объемной массой сотов  $41,0 \text{ кг/м}^3$ .

Полученные данные натурных испытаний образцов углесотопласта УСП-5,0 с объемной массой  $41,0 \text{ кг/м}^3$  будут использованы для корректировки исходных данных МКЭ модели УСП-5,0.

Для определения ФМХ УСП-5,0 с шестигранной ячейкой в программном комплексе МКЭ проведем серию численных экспериментов, имитирующих испытания на сдвиг сдвоенных образцов по ОСТ 1 90122-74, ОСТ 1 90144-74 [3].

В качестве материала для внешних пластин моделей МКЭ испытательного приспособления при сдвиге УСП примем сталь ( $E_{накл} = 250 \text{ ГПа}$ ). Толщина центральной пластины равна 10мм, а краевых пластин равна 5 мм. В программном комплексе МКЭ для определения модулей сдвига УСП моделирование произведем для 76 полных ячеек сотов. При определении ФМХ параллельно клеевым полосам в плоскости XY, образец ориентируем сдвоенными гранями по направлению нагружения, приложенное к средней металлической пластине с усилием 90Н (по 10Н в 9 точках) (рис. 1, а). Для определения ФМХ перпендикулярно клеевым полосам, моделирование произвели на той же модели МКЭ, но нагружение произведем в перпендикулярном направлении с усилием 160Н (по 10Н в 16 точках) (рис. 1, б). Закрепление модели МКЭ произвели по крайним металлическим пластинам, лишая их всех степеней свободы. Сгенерированные модели МКЭ образцов для определения модулей сдвига УСП представлены на рис. 1.

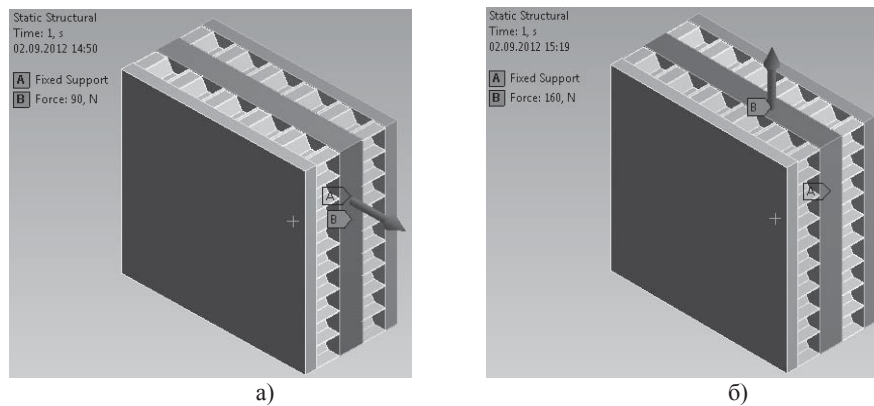


Рис. 1. Сгенерированная модель МКЭ образца СЗ:  
а — для определения ФМХ в плоскости XZ; б — для определения ФМХ в плоскости YZ.

Модуль упругости и предел прочности при сдвиге определены по стандартным методикам для рассматриваемых схем испытаний:

$$G_{xz} = \frac{P_x}{2ab\gamma_{xz}}, \quad G_{yz} = \frac{P_y}{2ab\gamma_{yz}}, \quad \tau_{xz} = \frac{P_x}{2ab}, \quad \tau_{yz} = \frac{P_y}{2ab}.$$

$$\gamma_{xz} = \arctg\left(\frac{\Delta_x}{h_{сз}}\right), \quad \gamma_{yz} = \arctg\left(\frac{\Delta_y}{h_{сз}}\right).$$

где  $P_x = 90 \text{ Н}$ ,  $P_y = 160 \text{ Н}$  — нагрузка по средней пластине,  $a = b = 80 \text{ мм}$  — размеры образца УСП,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  — углы сдвига,  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  — линейное смещение

средней нагруженной пластины, относительно неподвижных,  $h_{сз}$  — высота УСП.

Деформированные состояния испытываемых образцов УСП, построенных в комплексе МКЭ, представлены на рис. 2.

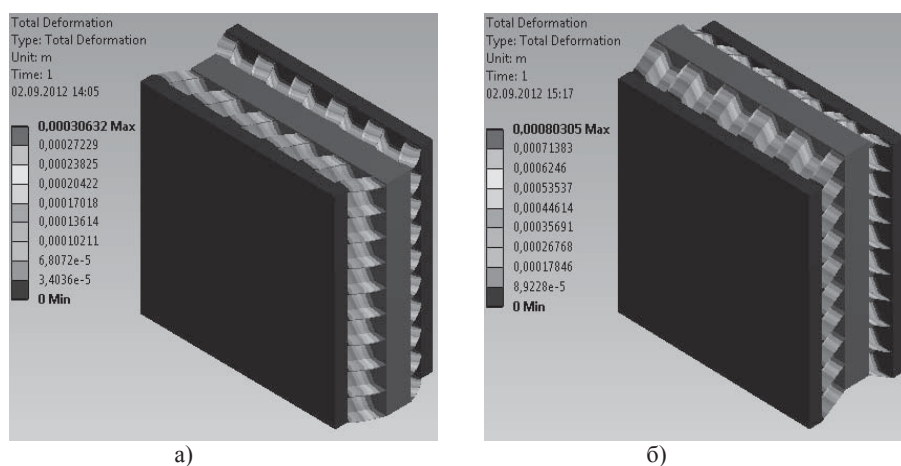


Рис. 2. Деформированные состояния моделей МКЭ образца УСП:

а — при определении модуля сдвига  $G_{xz}$ ; б — при определении модуля сдвига  $G_{yz}$

В таблице 2 приведены для сравнения результаты натурных испытаний и результаты, полученные с помощью системы конечно-элементного анализа.

Таблица 2

**Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными**

Характеристики	Значение показателя для СЗ на основе углеродного наполнителя УСП-5,0 (натурные испытания)	Значение показателя для СЗ на основе углеродного наполнителя УСП-5,0 (МКЭ)	Процент погрешности
Объемная масса сотов, кг/м <sup>3</sup>	41,00	41,00	–
Размер грани ячейки, мм	5,00	5,00	–
Предел прочности при сдвиге параллельно клеевым полосам, МПа	2,36	2,35	0,4%
Модуль упругости при сдвиге параллельно клеевым полосам, МПа	231,04	251,116	8,6%
Предел прочности при сдвиге перпендикулярно клеевым полосам, МПа	1,32	1,34	1,5%
Модуль упругости при сдвиге перпендикулярно клеевым полосам, МПа	169,75	155,81	8,2%

Таким образом, адаптированная МКЭ модель образца углеродного сотового наполнителя УСП-5,0 с объемной массой сотов 41,0 кг/м<sup>3</sup> с определенной

долей погрешности, позволяет проводить расчет изделий из УСП с последующим получением необходимых результатов ФМХ изделия минуя дорогостоящие натурные испытания.

*Приведены сравнительные физико-механические характеристики сотовых заполнителей различных марок. Определены исходные данные для расчета конструкций с использованием углесотопласта на основе результатов натурных испытаний в комплексах МКЭ.*

**Ключевые слова:** углепластиковые сотовые заполнители, метод конечных элементов.

*Physical and mechanical properties of honeycomb aggregates are seted. Data for calculation of constructions with carbonlayers using in methods of final results based of natural results.*

**Keywords:** carbonlayers honeycomb aggregate, method of final results.

1. *Сливинский В. И.* Свойства углесотопласта / В. И. Сливинский, Л. Н. Волконский, А. И. Алямовский // Решетневские чтения: матер. XV Междунар. научн. конф., (10–12 ноября 2011г., Красноярск): в 2 ч. / под. общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011.
2. *Сливинский В. И.* Легкий и прочный конструкционный материал для ракетно-космической техники / В. И. Сливинский, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. А. Коваленко, А. И. Алямовский // Сб. материалов 31 междунар. конф. “Композиционные материалы в промышленности” (6–10 июня 2010 г, Киев). – Украинский инфор. Центр “Наука. Техника. Технология”. – Киев, 2011. – С. 407–410.
3. *Гайдачук В. Е.* Определение рациональной схемы армирования углесотопласта при помощи МКЭ-поддержки / В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. И. Сливинский, М. Е. Харченко. – Системные технологии – 2012. – Вып. 2(79). – С. 3–12.