

УДК 629.7.023

В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский, М.Е. Харченко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ
УГЛЕСОТОПЛАСТА ПРИ ПОМОЩИ МКЭ-ПОДДЕРЖКИ**

При помощи МКЭ-поддержки оценено влияние различных схем армирования наполнителя углепластиковых сотов на его приведенные физико-механические характеристики. Приведены результаты серии численных экспериментов виртуальных образцов углесотопласта, имитирующих натурные испытания на поперечное растяжение и сдвиг параллельно и перпендикулярно клеевым полосам. Показано, что максимальные величины модулей упругости при поперечном растяжении углесотопласта соответствует схеме армирования $[\pm 75^\circ]$, а при сдвиге – $[\pm 45^\circ]$. Определена рациональная схема армирования углесотопласта $[\pm 64^\circ]$, обеспечивающая одновременно высокий уровень всех физико-механических характеристик. Выявлено снижение физико-механических характеристик углесотопласта от его высоты.

УГЛЕСОТОПЛАСТ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ВИРТУАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СХЕМА АРМИРОВАНИЯ.

Одним из приоритетных направлений по выбору рациональной конструктивно-силовой схемы для конструкций современной аэрокосмической техники является широкое применение трехслойных конструкций, элементы которых состоят из двух несущих слоев (НС) и заполнителя различной конфигурации между ними [1]. Одним из наиболее распространенных типов заполнителя является сотовый с ячейкой правильной шестигранной формы. Такой сотовый заполнитель (СЗ) технологичен, обладает высокими удельными жесткостными и прочностными характеристиками [2, 3]. В качестве его основы обычно служит алюминиевая фольга, полимерная бумага или стеклопластик [2 – 5].

В настоящее время все шире используются соты на основе углеволокон, что позволяет в значительной мере повысить прочность и жесткость сотовых конструкций, а также увеличить ресурс их работы. Углесотопласт (УСП), имея максимальные абсолютные и удельные показатели прочности и жесткости при сдвиге и сжатии

© Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В.,
Сливинский В.И., Харченко М.Е., 2012

[4, 5], обладает минимальным коэффициентом линейного расширения, что в сочетании с углепластиковыми несущими слоями (НС) позволяет создать химически однородные размеростабильные конструкции, которые широко применяются в аэрокосмической отрасли [6].

Расчетами и испытаниями установлено, что для СЗ основными упругими физико-механическими характеристиками (ФМХ) являются модуль упругости в направлении, перпендикулярном НС – E_z и модули сдвига в плоскостях граней сотов параллельно и перпендикулярно клеевым полосам соответственно – G_{xz} и G_{yz} [2 – 3]. Величины остальных модулей упругости и сдвига пренебрежимо малы и в расчетах обычно не учитываются. В большинстве случаев в зависимости от степени ответственности трехслойных сотовых конструкций заключение о величинах его приведенных ФМХ производятся только по результатам обработки натуральных испытаний сотов, которые являются весьма дорогостоящими, особенно при использовании для сотов углеродного наполнителя.

Учитывая выше сказанное, представляется обоснованным применение программного комплекса метода конечных элементов (МКЭ) для проведения серии численных экспериментов, имитирующих натурные испытания [2, 3].

Нами ранее в работе [7] при помощи МКЭ-поддержки оценено влияние различных схем армирования наполнителя углепластиковых сотов на приведенные модули сдвига и показано, что их максимальные величины, соответствующих схеме $[\pm 45^\circ]$, больше минимальных, соответствующих схеме армирования $[0^\circ; 90^\circ]$, более чем в 5 раз.

Ниже приводятся результаты поиска рациональной схемы армирования наполнителя УСП, которая одновременно обеспечивала бы высокий уровень для всех приведенных ФМХ – модуля упругости E_z и сдвига G_{xz} и G_{yz} .

Принятые для дальнейших численных экспериментов в программном комплексе МКЭ ФМХ углеродного наполнителя для УСП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Принятые для дальнейших численных экспериментов
ФМХ углеродного наполнителя УСП

Марка углепластика	Толщина препрега (монослоя), t , мм	Модуль упругости вдоль волокон, E_1 , ГПа	Модуль упругости поперек волокон, E_2 , ГПа	Модуль сдвига G_{12} , ГПа	Коэффициент Пуассона, μ_{12}

КМУ-4Э	0,1	115	28,3	5,5	0,25
--------	-----	-----	------	-----	------

Для определения модулей упругости при сдвиге УСП с правильной шестигранной ячейкой в программном комплексе МКЭ имитировались испытания на сдвиг сдвоенных образцов методом растяжения по ОСТ 101188-92) [2, 3]. Моделирование произведено для 162 полных ячеек сотов. При определении модуля сдвига в плоскости ХОZ (параллельно клеевым полосам) образец был сориентирован сдвоенными гранями по направлению нагружения, которое произведено по средней накладке усилием 90Н (по 10Н в 9 точках) (рис. 1, а). Для определения модуля сдвига в плоскости ХОУ (перпендикулярно клеевым полосам) моделирование произведено на той же модели МКЭ, но нагружение проводилось изведем в другом направлении по средней накладке усилием 200Н (по 10Н в 20 точках) (рис. 1, б). Закрепление моделей МКЭ произведено по боковым ненагруженным накладкам по всем линейным перемещениям. В качестве материала для внешних пластин моделей МКЭ испытательного приспособления при сдвиге УСП принята сталь ($E_{накл} = 210 \text{ ГПа}$); толщина центральной пластины равна 10мм, краевых – 5мм.

Для определения модуля упругости УСП при поперечном растяжении E_z моделирование было произведено на единичном образце описанной выше модели МКЭ. Нагружение проводилось по внешней накладке давлением 0.1МПа, а закрепление по другой накладке на все линейные перемещения (рис. 1, в).

На рис. 1 представлены сгенерированные конечно-элементные модели образцов для определения модулей упругости УСП и соответствующие им граничные условия.

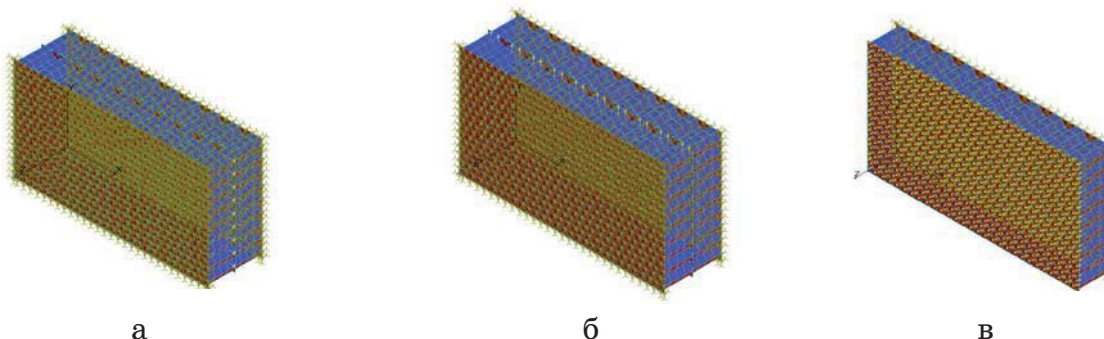


Рис.1. Сгенерированная конечно-элементная модель образцов УСП высотой 20 мм:

- а – для определения модуля сдвига G_{xz} ;
- б – для определения модуля сдвига G_{yz} ;

в – для определения модуля упругости при поперечном растяжении E_z

На рис. 2 представлены полученные в результате численного эксперимента деформированные состояния виртуальных образцов УСП.

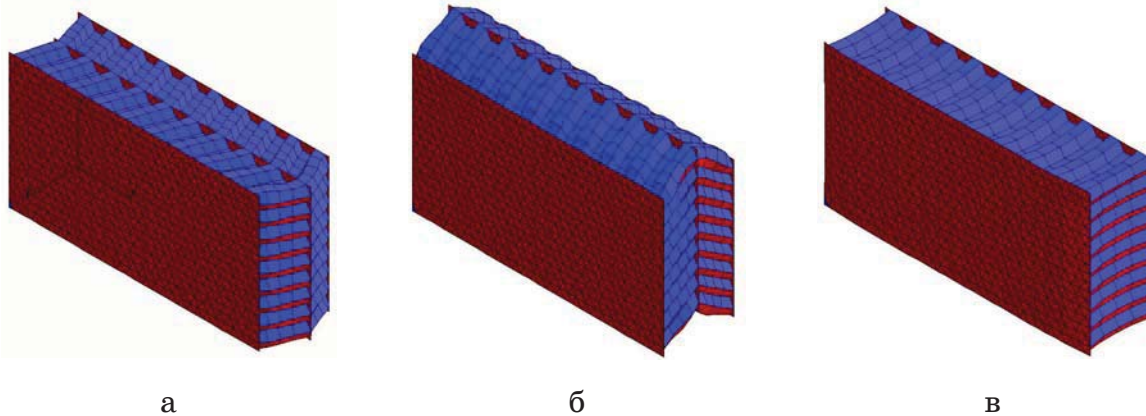


Рис. 2. Деформированные состояния моделей МКЭ виртуального образца УСП высотой 20 мм:

а – при определении модуля сдвига G_{xz} ;

б – при определении модуля сдвига G_{yz} ;

в – при определении модуля упругости при поперечном растяжении E_z

Как известно, решение краевой задачи линейной теории упругости возможно в постановке перемещений и напряжений. При нахождении величин приведенных ФМХ УСП в качестве граничных условий были использованы картины перемещений. Учитывая, что наличие краевых эффектов делает эти картины неравномерными, то в качестве расчетных были использованы осредненные по всем узлам величины перемещений. При этом величины модулей упругости определились по стандартным методикам для рассматриваемых схем испытаний [2, 3].

В табл. 2 представлены полученные результаты реализации серии численных экспериментов в программном комплексе МКЭ по нахождению модулей упругости УСП для рассматриваемых схем армирования наполнителя различной высоты.

На рис. 3 представлена система координат, принятая для отсчитывания различных углов армирования $\pm\varphi$ УСП.

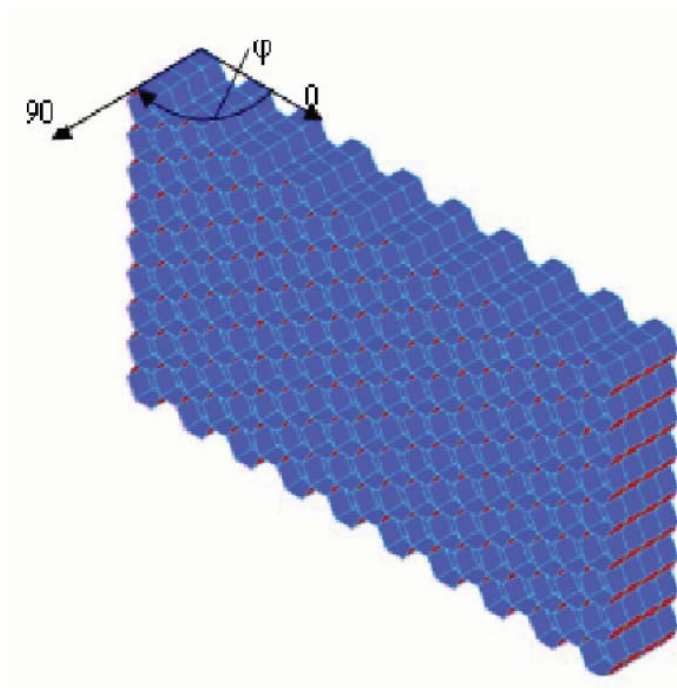


Рис. 3. Система координат, принятая для отсчитывания различных углов армирования УСП

Таблица 2

Зависимость ФМХ УСП от схемы армирования УСП и его высоты

Размер грани ячейки СЗ a_c , мм	Схема армирования УСП	Высота УСП в образцах $h_{сз}$, мм	Модуль упругости при поперечном растяжении E_z , МПа	Модуль упругости при сдвиге параллельно клеевым полосам G_{xz} , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП перпендикулярно клеевым полосам G_{yz} , МПа
5	[0°; 90°]	10	4520	235	201
		20	4511	221	165
		30	4505	211	149
	[±15°]	10	1712	478	354
		20	1688	447	310
		30	1671	427	289
	[±30°]	10	1808	962	678
		20	1699	900	611
		30	1624	858	565
	[±45°]	10	2679	1210	842
		20	2423	1137	770
		30	2269	1083	714
	[±60°]	10	4488	979	690
		20	4270	931	639
		30	4141	895	602
	[±75°]	10	6425	488	369
		20	6367	468	333
		30	6328	451	312

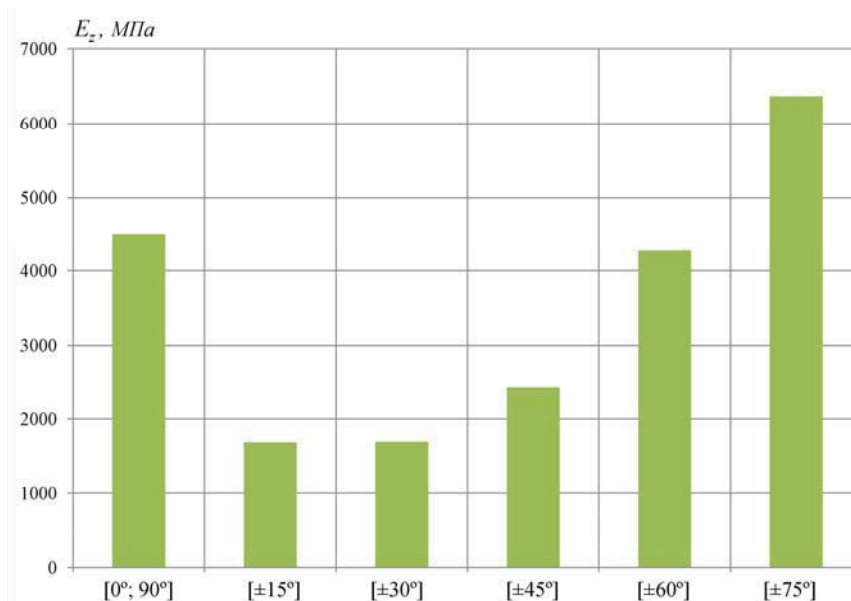


Рис. 4. Гистограмма зависимости модуля упругости УСП при поперечном растяжении от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{cz}=20$ мм

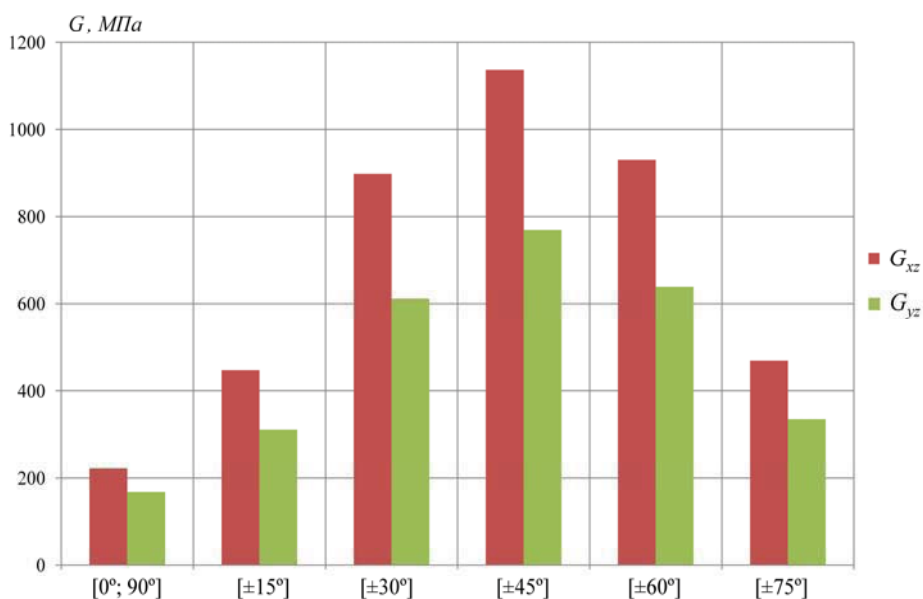


Рис. 5. Гистограмма зависимости модулей упругости УСП при сдвиге от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{cz}=20$ мм

Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальные приведенные модули упругости УСП при растяжении и сдвиге обеспечивают различные схемы армирования сотов. Так, при схеме армирования [±45°] УСП имеет максимальные приведенные ФМХ при сдвиге, а при схеме [±75°] – при растяжении. Также наблюдается некоторое снижение ФМХ УСП с ростом его высоты.

Для определения рациональной схемы армирования УСП, обеспечивающей одновременно высокий уровень приведенных ФМХ при растяжении и сдвиге, построим график зависимости следующих относительных ФМХ УСП

$$\bar{E}_z = \frac{E_z}{E_z^{\max}}, \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}} \quad (1)$$

от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя (рис. 6).

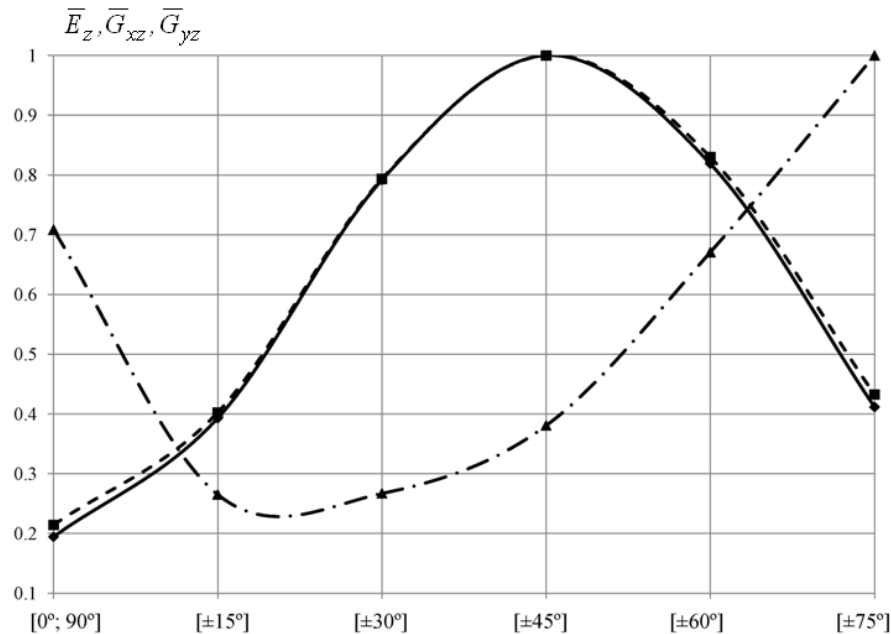


Рис. 6. График зависимости относительных приведенных ФМХ УСП от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{c3}=20\text{мм}$

$$\text{—} \blacksquare \text{—} - \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \text{—} \blacklozenge \text{—} - \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}}, \text{—} \blacktriangle \text{—} - \bar{E}_z = \frac{E_z}{E_z^{\max}}$$

Анализ полученных результатов свидетельствуют о том, что одновременно высокий уровень ФМХ УСП при поперечном растяжении и сдвиге возможен только для схем армирования сотов, лежащих в диапазоне $\pm 60^\circ \dots \pm 70^\circ$.

В табл. 3 представлены результаты реализации серии численных экспериментов в программном комплексе МКЭ по нахождению ФМХ УСП для близких к рациональной схем армирования сотов при $h_{c3}=20\text{мм}$.

Учитывая, что величины относительных ФМХ УСП при сдвиге \bar{G}_{xz} , \bar{G}_{yz} практически совпадают (см. рис. 6), то при определении

рациональной схемы армирования сотов будем ориентироваться только на модули упругости при поперечном растяжении E_z и сдвиге параллельно клеевым полосам G_{xz} .

Таблица 3
Зависимость ФМХ УСП от схем армирования сотов, близких к рациональной

Размер грани ячейки СЗ a_c , мм	Высота УСП в образцах h_{c3} , мм	Схема армирования сотов	Модуль упругости при поперечном растяжении E_z , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП параллельно клеевым полосам G_{xz} , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП перпендикулярно клеевым полосам G_{yz} , МПа
5	20	$[\pm 60^\circ]$	4270	931	639
		$[\pm 65^\circ]$	5026	784	542
		$[\pm 70^\circ]$	5746	622	435

График зависимости относительных модулей упругости при поперечном растяжении и сдвиге от схем армирования УСП, близких к рациональной, при фиксированной высоте заполнителя представлен на рис. 7.

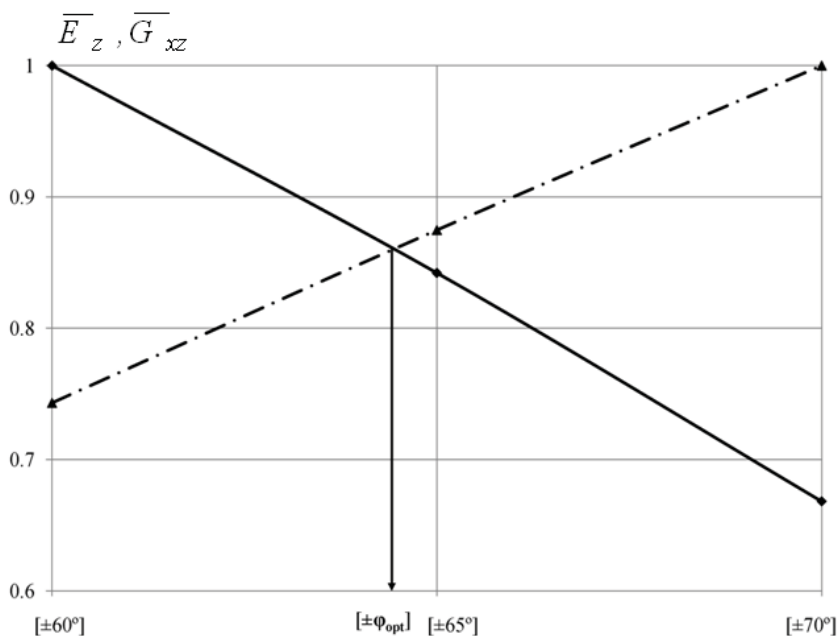


Рис. 7. График зависимости модулей упругости и сдвига параллельно клеевым полосам от схем армирования сотов, близких к рациональной при фиксированной высоте заполнителя $h_{c3}=20$ мм

$$\text{—} \bullet \text{—} - \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \quad \text{—} \blacksquare \text{—} - \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}}$$

Анализ полученных результатов свидетельствуют о том, что одновременно достаточно высокий уровень ФМХ УСП при поперечном растяжении и сдвиге обеспечивает схема армирования $\pm 64^\circ$.

Выводы

Проанализировав полученные выше результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Схема армирования УСП существенным образом влияет на его ФМХ. Так, к примеру, для высоты сотов $h_{сз}=20$ мм величины максимальных модулей сдвига УСП, соответствующих схеме армирования $[\pm 45^\circ]$, превосходят минимальные при схеме армирования $[0^\circ; 90^\circ]$ более чем в 5 раз. Максимальный модуль упругости УСП при поперечном растяжении, соответствующий схеме армирования $[\pm 75^\circ]$, превосходит минимальный при схеме армирования $[\pm 15^\circ]$ более чем в 3 раза.

2. Для обеспечения одновременно высокого уровня модулей упругости при растяжении и сдвига УСП, необходимо ориентироваться на схему армирования $\pm 64^\circ$.

3. Наблюдается снижение значений ФМХ УСП от его высоты. Так при схеме армирования основы сотов $[\pm 45^\circ]$ для модуля сдвига параллельно клеевым полосам снижение модуля сдвига составляет $\Delta G_{xz}(h_{сз}) \approx 10\%$, а перпендикулярно – $\Delta G_{yz}(h_{сз}) \approx 15\%$ относительно этих значений при высоте СЗ $h_{сз}=10$ мм. При поперечном растяжении снижение модуля упругости для схемы армирования $[\pm 75^\circ]$ соответственно равно $\Delta E_z(h_{сз}) \approx 2\%$.

Список литературы

1. Иванов А.А. Трехслойные конструкции с заполнителем в современной технике / А.А. Иванов, Ю.Л. Вильницкая. – М. : ЦНТИ «Поиск», 1987. – 154 с.
2. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем / В.Ф. Панин. – М.: Машиностроение, 1980. – 228 с.
3. Ендогур А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.

4. Сотовые наполнители в конструкциях авиационно-космического назначения / В.И. Сливинский, В.С. Зевако, Г.В. Ткаченко, О.А. Карпикова // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т.14. – №3. – С. 101 – 107.
5. Легкий и прочный конструкционный материал для ракетно-космической техники / В.И. Сливинский, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, А.И. Алямовский // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 31 междунар. конф. 6-10 июня 2010г / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – Киев, 2011. – С. 407 – 410.
6. Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV междунар. науч.-практич. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – 200 с.
7. Оценка физико-механических характеристик углесотопласта различной схемы армирования при помощи МКЭ-поддержки / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 54- 59.