

УДК 629.7.01:539.4

**В. И. Сливинский, В. С. Зевако, Г. В. Ткаченко, О. А. Карпикова**

ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

## **Сотовые заполнители в конструкциях авиационно-космического назначения**

*Надійшла до редакції 14.07.08*

Наведено функціональні, механічні та теплофізичні характеристики перспективних стільникових заповнювачів із алюмінієвої фольги, полімерного паперу «Nomex», скляної тканини та вуглецевих наповнювачів для стільникових конструкцій авіаційно-космічного призначення.

Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» — головная организация Национального космического агентства Украины по технологии машиностроения с 45-летним опытом работы в области технологического обеспечения машиностроительных, в том числе ракетно-космических производств, имеет в своем составе подразделение, занимающееся более 30 лет вопросами разработки технологии и изготовления сотового заполнителя (СЗ), его оптимизацией и изготовлением конструкций на их основе.

Главной особенностью сотовых конструкций является то, что она имеет момент инерции поперечного сечения, значительно больший, чем однослойная. Вследствие увеличения момента инерции растет поперечная жесткость и повышается критическое напряжение общей потери устойчивости. При работе на поперечный изгиб сотовая конструкция выгодна благодаря увеличению момента сопротивления по сравнению с однослойной. Таким образом, в сотовой конструкции разнесение несущих слоев на расстояние увеличивает ее устойчивость, жесткость и изгибающую прочность по сравнению с монолитной.

Кроме того, такие конструкции обладают хорошими теплопроводностью (соты из алюминиевой фольги), звуко- и теплоизолирующими

свойствами (соты на основе полимерной бумаги «Nomex» и стеклоткани); технологичны вследствие минимального количества деталей при сборке конструкции; имеют высокое аэродинамическое качество поверхности; отличаются высокой эксплуатационной надежностью, вибрационной прочностью [1].

Физико-механические характеристики (ФМХ), звуко-, теплоизолирующая и теплопередающая способность СЗ регулируются за счет изменения формы, размера ячейки, марки и толщины основы, высоты сотов. Сотовые заполнители — это семейство регулярных ячеистых конструкций, которые отличаются друг от друга по конфигурации ячейки, исходному материалу и методу изготовления. Размеры и форма ячеек СЗ определяется назначением конструкции и эксплуатационными нагрузками действующими на сотовые панели или оболочки.

Самый простой и распространенный тип сотов — заполнитель с шестигранной формой ячейки. Он технологичен, обеспечивает высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики. Такая конфигурация применяется как для металлических, так и неметаллических сотов. Есть различные модификации шестигранной формы ячейки [2]. Например, ячейка с мелким рифлением стенок повышает гибкость СЗ и обеспечивает развитие поверхности, склеивае-

мой с несущими слоями. Смещение гофрированных заготовок также повышает гибкость СЗ. Для повышения прочности и жесткости СЗ применяют усиливающие ленты или удлиняют двойную грань ячейки. Разновидностью СЗ с шестигранной формой ячейки является наполнитель с прямоугольной формой, который изготавливается перетяжкой заготовок с шестигранной ячейкой. Такой наполнитель легко выкладывается на цилиндрические поверхности. Наполнитель с гибкой формой ячейки «флекс» обладает способностью деформироваться, образуя сложные криволинейные поверхности. Наполнитель с цилиндрической формой ячейки имеет высокие удельные параметры прочности и жесткости, а с формой ячеек, имеющих перегибы и изломы, расположенные между участками соединения материала основы сотов, отличается повышенной гибкостью, которая необходима при изготовлении изделий сложной кривизны. Наполнитель с ромбической формой ячейки обладает минимальной массой за счет уменьшения длины сдвоенных стенок ячейки.

У перечисленных видов СЗ отношение сдвиговых механических характеристик вдоль линии соединения гофрированных заготовок и в перпендикулярном направлении имеет строго фиксированную величину. При оптимизации сотовой конструкции по массе возникает необходимость изменять эту величину. Применение СЗ в таких случаях с ячейкой в виде правильного шестигранника приводит к увеличению массы сотовой конструкции. В целях создания оптимальных по массе сотовых конструкций авторами разработана обобщенная форма ячейки, которая за счет изменения значений геометрических и технологических параметров трансформируется в ячейки в виде ромба, квадрата, прямоугольника и др. с возможностью изменять ФМХ СЗ в нужном направлении [3].

Для изготовления СЗ применяют следующие основные способы:

- растяжение (расширение) — изготовление пакета из плоских листов соединенных в шахматном порядке с последующим растяжением;
- блочный — гофрирование и сборка-склейка гофрированных заготовок;
- объемное ткачество — отдельные элементы СЗ соединены между собой механическим переплетением волокон материала;

- экструдирование — может получаться как сама сотовая конструкция, так и отдельные ее элементы.

Метод изготовления СЗ растяжением пакетов считается одним из лучших. Он поддается механизации и автоматизации, и поэтому нашел широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности.

СЗ могут изготавливаться и из отдельных элементов с последующим их соединением.

В качестве материала основы СЗ может служить алюминиевая фольга, полимерная бумага, стеклоткань, углеродная, полимерные пленки и другие материалы [2].

В табл. 1 перечислены физические величины, которые будут использованы ниже для описания физико-механических характеристик различных материалов.

Сотовый наполнитель из алюминиевой фольги (АЛС) (табл. 2) — наиболее распространенный конструкционный материал, используемый в летательных аппаратах, работающих в различных условиях и воспринимающих постоянно действующие и знакопеременные нагрузки, в том числе акустические. Его основные особенности — высокая прочность и жесткость по отношению к весу [4], высокая теплопроводность и сопротивление усталости, хорошие антивибра-

Таблица 1. Обозначения физико-механических параметров

Параметр	Обозначение	Единицы измерения
Плотность	$\gamma$	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$	МПа
Предел прочности при сдвиге параллельно клеевым полосам	$\tau_{xz}$	МПа
Предел прочности при сдвиге перпендикулярно к клеевым полосам	$\tau_{yz}$	МПа
Модуль упругости при сдвиге параллельно клеевым полосам	$G_{xz}$	МПа
Модуль упругости при сдвиге перпендикулярно к клеевым полосам	$G_{yz}$	МПа
Удельная прочность	$\tau/\gamma$	км
Удельный модуль упругости	$G/\gamma$	км
Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	Вт/(м·К)
Размер грани ячейки	$d$	мм
Содержание связующего	СС	%
Степень полимеризации	СП	%
Высота наполнителя	$h$	мм

Таблица 2. Физико-механические характеристики сотовых наполнителей на основе алюминиевой фольги (АЛС) и полимерной бумаги (ПСП)

№	Марка сотопласта	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$	$\tau_{xz}$	$\tau_{yz}$	$G_{xz}$	$G_{yz}$
АЛС (высота наполнителя $h = 18$ мм)							
1	АМГ2-Н-2.5-30	44—57	1.2	1.0	0.73	200	120
2	5052-2.5-30	46—55	1.2	1.0	0.70	200	105
3	АМГ2-Н-2.5-40	60—75	2.4	1.35	0.93	230	135
4	АМГ2-Н-5.0-30	22—30	0.6	0.50	0.25	107	60
5	5052-5.0-30	23—28	0.58	0.44	0.25	91	55
6	АМГ2-Н-5.0-40	30—38	0.75	0.60	0.35	130	55
ПСП							
1	ПСП-1-1.85-48 2.0—48 2.3—48 2.5—48	48	1.4	1.0	0.7	35	20
2	ПСП-1-1.85-64 2.0—64 2.3—64 2.5—64	64	1.7	1.3	0.8	50	30
3	ПСП-1-1.85-96 2.0—96 2.3—96 2.5—96	96	5.0	1.9	1.4	70	40
4	ПСП-1-1.85-144 2.0—144 2.3—144 2.5—144	144	12.0	3.8	2.2	90	60
5	ПСП-1-1.85-200 2.0—200 2.3—200 2.5—200	200	14.0	4.5	2.9	120	80

Таблица 3. Физико-механические характеристики сотовых наполнителей на основе стеклоткани

Марка	$d$ , мм	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	СС, %	СП, %	$h = 15$ мм		$h = 10$ мм		
					$\sigma_{сж}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа	$G_{xz}$ , МПа	$G_{yz}$ , МПа
ССП-1Эд	2.5	95—110	35—45	95—99	4.0	2.0	1.2	130	60
	3.5	75—90			3.2	1.8	1.0	100	55
	4.2	60—75			2.2	1.3	0.8	65	45
	5.0	50—60			1.8	1.1	0.7	50	25

ционные характеристики, негорючесть, сохранение свойств при повышенной температуре, возможность обработки сложных поверхностей.

Из всей гаммы сотовых наполнителей представляет особый интерес полимерсотопласт (ПСП) — СЗ из полимерной бумаги, ФМХ которого также приведены в табл. 2 [5]. Конструкции на основе ПСП имеют ряд уникальных особенностей: легкость при высоком уровне ме-

ханических характеристик; способность сохранять эксплуатационные качества при перегрузках и локальных областях без необратимых повреждений, хорошие тепло-, звукоизоляционные характеристики. Такие свойства привели к широкому использованию материалов на основе полимерной бумаги для облегченных конструкций интерьеров и обитаемых космических станций, для теплошумоизоляции подобтекательного

Таблица 4. Абсолютные и удельные физико-механические характеристики сотового заполнителя на основе углеродной ткани

Вид сотов	$d$ , мм	$\gamma$ , $\text{г/м}^3$	$\sigma_{\text{СЖ}}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа	$\sigma_{\text{СЖ}}/\gamma$ , кМ	$\tau_{xz}/\gamma$ , кМ	$\tau_{yz}/\gamma$ , кМ	$G_{\text{рас}}$ , МПа	$G_{xz}$ , МПа	$G_{yz}$ , МПа	$G_{\text{СЖ}}/\gamma$ , кМ	$G_{xz}/\gamma$ , кМ	$G_{yz}/\gamma$ , кМ
УСП (ЭНФБ+ЭЛУР-0.1П)	5.0	110	12.4	6.0	4.5	11.2	5.4	4.1	575	590	450	522	536	409
УСП (ЭНФБ+ЛУ-П)	8.0	94	5.9	3.5	2.8	6.2	3.7	3.0	101	700	360	107	745	383

Таблица 5. Удельные физико-механические характеристики сотовых заполнителей из алюминиевой фольги, полимерсотопласта и стеклосотопласта

№	Марка сотопласта	$\sigma_{\text{СЖ}}/\gamma$ , кМ	$\tau_{xz}/\gamma$ , кМ	$\tau_{yz}/\gamma$ , кМ	$G_{xz}/\gamma$ , кМ	$G_{yz}/\gamma$ , кМ
Алюминиевая фольга						
1	АМГ2-Н-2.5-30	2.4	2.0	1.45	396.0	237.6
2	5052-2.5-30	2.4	2.0	1.39	396.0	207.9
3	АМГ2-Н-2.5-40	3.6	2.0	1.4	340.7	200.0
4	АМГ2-Н-5.0-30	2.31	1.9	1.0	411.5	230.8
5	5052-5.0-30	2.27	1.7	1.0	356.9	215.7
6	АМГ2-Н-5.0-40	2.2	1.8	1.0	382.4	161.8
Полимерсотопласт						
1	ПСП-1-1.85-48 2.0-48 2.3-48 2.5-48	2.9	2.1	1.5	72.9	41.7
2	ПСП-1-1.85-64 2.0-64 2.3-64 2.5-64	2.7	2.0	1.3	78.1	46.9
3	ПСП-1-1.85-96 2.0-96 2.3-96 2.5-96	5.2	2.0	1.5	72.9	41.7
4	ПСП-1-1.85-144 2.0-144 2.3-144 2.5-144	8.3	2.6	1.5	62.5	41.7
5	ПСП-1-1.85-200 2.0-200 2.3-200 2.5-200	7.0	2.3	1.5	60.0	40.0
Стеклосотопласт						
1	ССП-Иэд.-2.5	3.9	2.0	1.2	126.83	58.54
2	3.5	3.9	2.2	1.2	121.21	66.67
3	4.2	3.3	1.9	1.2	96.30	66.67
4	5.0	3.3	2.0	1.3	90.91	45.45

пространства головного обтекателя ракеты-носителя. Эти преимущества делают его конкурентоспособным, несмотря на высокую стоимость. СЗ на основе полимерной бумаги обладает высо-

кими показателями соотношения прочности и веса, имеет низкие плотности, коррозионностойкий, самозатухающий, имеет прекрасную устойчивость прочностью и ударопоглощение [6].

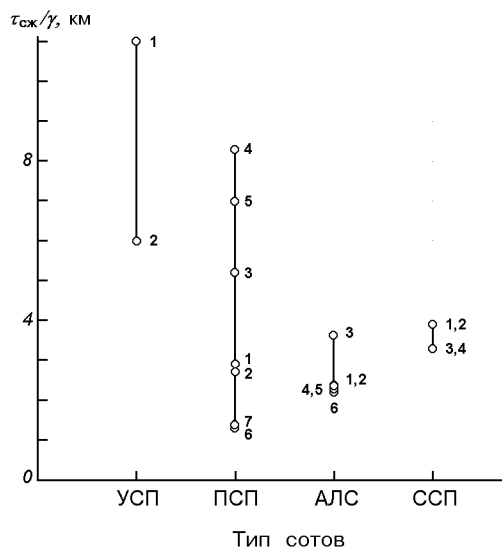


Рис. 1. Удельная прочность при сжатии различных сотов. Цифрами на рис. 1—3 обозначены разные марки сотовых наполнителей:

УСП: 1. УСП (ЭНФБ+ ЭЛУР-0.1П)5.0	АЛС: 1. АМГ-Н-2.5-30
2. УСП (ЭНФБ+ ЛУ-П)8.0	2. 5052-2.5-30
ПСП: 1. ПСП-1-1.85-48	3. АМГ-Н-2.5-40
2. ПСП-1-1.85-64	4. АМГ-Н-5.0-30
3. ПСП-1-1.85-96	5. 5052-5.0-30
4. ПСП-1-1.85-144	6. АМГ-Н-5.0-40
5. ПСП-1-1.85-200	ССП: 1. ССП-Иэд-2.5
6. ПСП-1-4.2-25	2. ССП-Иэд-3.5
7. ПСП-1-3.5-35	3. ССП-Иэд-4.2
	4. ССП-Иэд-5

Стеглосотопласты (ССП) — это вид материалов, широко используемый в тех случаях, когда необходимо создать конструкции со специальными электрофизическими свойствами (например, для радиопрозрачных антенн радиолокаторов) или когда к изделию предъявляются требования по теплостойкости и низкой теплопроводности. Они прекрасно служат как матрицы для неструктурированных абляционных материалов. ССП обеспечивает при минимальной массе конструкции высокий коэффициент теплоизоляции. Эффективность тепловой защиты можно повысить заполнением сотовых ячеек специальными материалами. Физико-механические характеристики стеклосотопластов представлены в табл. 3 [7].

Углесотопласт (УСП) имеет максимальные абсолютные и удельные показатели прочности и

жесткости при сдвиге и сжатии (табл. 4) [8]. УСП обладает минимальным коэффициентом линейного расширения и в сочетании с углепластиковыми обшивками позволяет создать химически однородные размеростабильные конструкции. Однако к недостаткам следует отнести высокую стоимость и необходимость механической обработки даже для поверхностей малой кривизны из-за недостаточной его гибкости. Соты на основе углеродного наполнителя широко используются в трехслойных конструкциях в качестве заполнителя и элементов каркаса, поскольку позволяют значительно повысить прочность и жесткость конструкции, расширить ресурс работы изделий за счет создания однородных по химической природе элементов трехслойных сотовых конструкций.

Сравнение физико-механических показателей различных сотов удобно проводить по удельным прочностным характеристикам (табл. 4 и 5, рис. 1—3).

Анализ представленных данных показывает, что самые высокие удельные показатели прочности и жесткости при сдвиге и сжатии имеет УСП. ПСП находится на втором месте после УСП по удельным прочностным характеристикам и на последнем по удельным жесткостным характеристикам. Сотовый наполнитель из алюминиевой фольги находится на последнем месте по удельным прочностным характеристикам, и на втором — по жесткостным. ССП имеет характеристики по удельным показателям прочности при сдвиге и сжатии на уровне характеристик АЛС.

Помимо физико-механических характеристик, при эксплуатации СЗ необходимо учитывать их теплофизические свойства, в частности теплопроводность [9].

Нами были определены коэффициенты теплопроводности СЗ из различных материалов в составе трехслойной конструкции. Результаты испытаний образцов представлены в табл. 6. Как видно, наибольший коэффициент теплопроводности имеет наполнитель из АЛС, наименьший — наполнитель ПСП. Результаты испытаний показывают, что с увеличением размера стороны ячейки с 2.5 до 5.0 мм теплопроводность стеклосотопласта возрастает незначительно (на 7.0 %), наполнителя из АЛС снижается на 16.0 %.

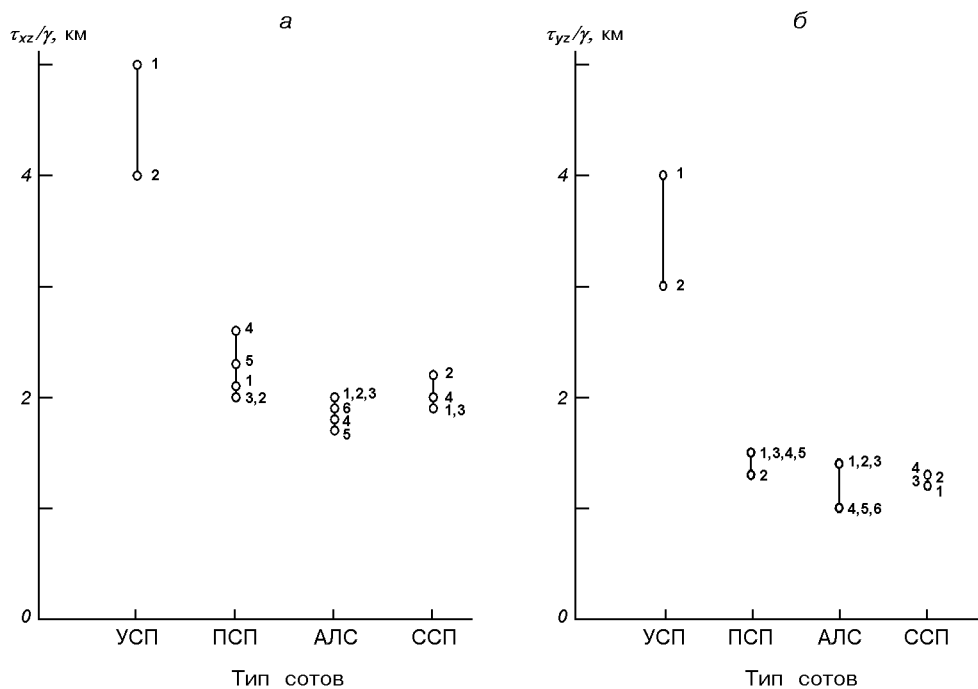


Рис. 2. Удельная прочность при сдвиге сотов из различных материалов: *а* — параллельно плоскости склейки; *б* — перпендикулярно к плоскости склейки

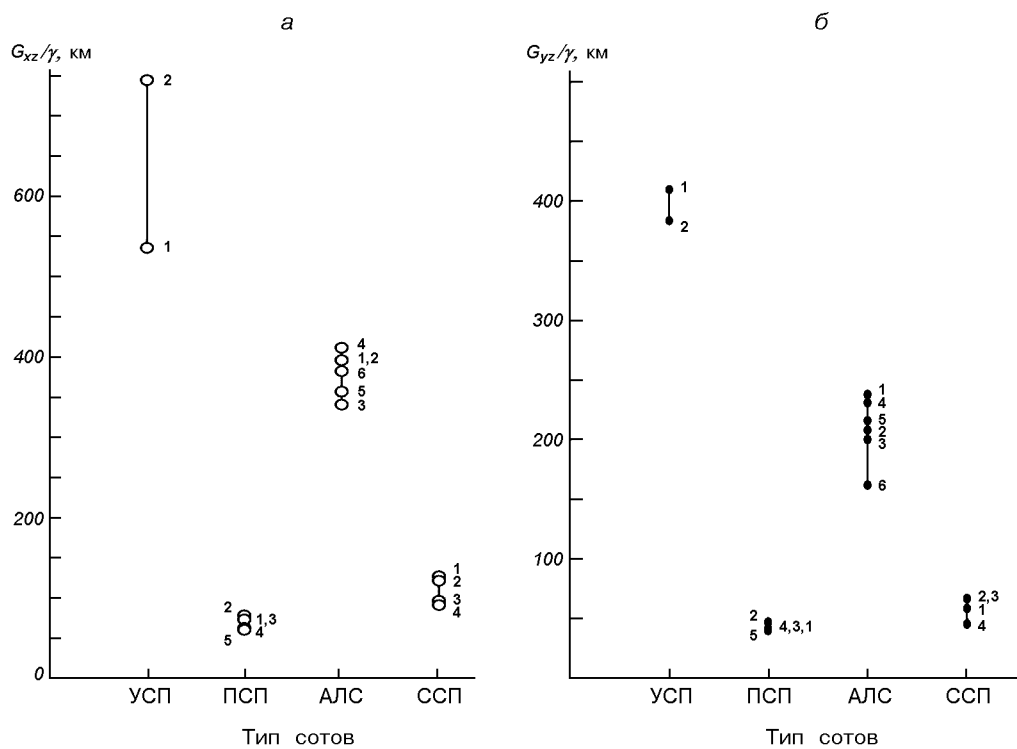


Рис. 3. Удельный модуль упругости при сдвиге различных сотов: *а* — параллельно плоскости склейки; *б* — перпендикулярно к плоскости склейки

Таблица 6. Коэффициенты теплопроводности сотовых наполнителей

Марка сотопласта	$d$ , мм	$h$ , мм	Толщина трехслойного образца, мм	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·град)
Углесотопласт (УСП)	5.0	17.2	19.8	110.0	0.327
Стеклосотопласт (ССП) (толщина стеклоткани 33-100 $\sigma=100$ мкм)	2.5 5.0	17.0 12.5	14.5 10.0	55.2 81.0	0.105 0.112
Полимерсотопласт (ПСП) (бумага БФСК толщиной $\sigma=50$ мкм)	3.5	12.5	10.0	37.2	0.085
Заполнитель из фольги АМг2-Н (АЛС) (толщина фольги $\sigma=30$ мкм)	2.5 5.0	17.2 17.2	15.0 15.0	58.3 27.6	0.610 0.523

Таким образом, использование того или иного сотового наполнителя для сотовых конструкций авиационно-космического назначения определяется назначением, эксплуатационными, физико-механическими и теплофизическими характеристиками изделия.

Для обеспечения предприятий РКТ и авиации в ОАО УкрНИИТМ создано единственное на Украине производство СЗ из различных материалов. Производится более 60 типоразмеров СЗ. В настоящее время освоено изготовление СЗ шестигранной формой ячейки на основе алюминиевой фольги толщиной от 20 до 50 мкм из сплавов марок АМг2-Н, 5052, 5056. По желанию заказчика для СЗ из алюминиевой фольги могут быть различные комбинации марок фольги, ее толщины и размеров ячеек. СЗ из фольги поставляются в виде сотопакетов размером 860 × 400 мм с количеством слоев от 250 до 750. СЗ из стеклоткани выпускаются в виде панелей размером 300 × 1000 мм ×  $h$ . СЗ из полимерной бумаги выпускаются в виде панелей размером 340 × 1000 мм ×  $h$ . СЗ из крафт-бумаги поставляются в виде долек заданной высоты, длиной 700 мм с количеством от 200 до 500.

Испытательная база предприятия обеспечивает определение всего комплекса необходимых физико-механических характеристик СЗ. При необходимости ОАО УкрНИИТМ оказывает помощь в выборе СЗ, выполнении расчета и создании трехслойных сотовых конструкций с учетом заданных физико-механических характеристик.

1. Берсудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. М. Производство сотовых конструкций. — М.: Машиностроение, 1975.—296 с.
2. Гладков Ю. А., Панин В. Ф. Конструкции с наполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
3. Исследование и разработка технических решений по созданию прогрессивной технологии и оборудования для изготовления сотов: (Отчет) / УкрНИИТМ. — Днепропетровск, 1990.—269 с.
4. ОСТ 92-4495-84. Заполнители сотовые на основе стеклоткани.
5. Сливинский В. И. Конструктивно-технологические решения и технология производства сотов с регулируемыми механическими характеристиками и сотовых конструкций для летательных аппаратов: Дис. ... канд. тех. наук. — Харьков, 1992.—341 с.—Машинопись.
6. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера и др. — М.: Машиностроение, 1988.—Кн. 2.—584 с.
7. ТУ 92-923-2-69-82. Панели углесотопластиковые марки УСП.
8. ТУ 1-596-231-01. Полимерсотопласты (ПСП).
9. ТУ14311577.237-02. Заполнители сотовые клеенные из алюминиевой фольги.

#### HONEYCOMB CORES FOR HONEYCOMB STRUCTURES OF AEROSPACE ASSIGNMENT

*V. I. Slyvyn's'kyu, V. S. Zevako, G. V. Tkachenko, O. A. Karpikova*

The paper describes functional, mechanical, and thermal-physical characteristics of honeycomb cores made of aluminium foil, Nomex polymeric paper, glass cloth and carbon fillers, which are considered promising for honeycomb structures of aerospace assignment.