

## Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах

© Е.А. Иванов<sup>1,3</sup>, А.А. Иконникова<sup>1</sup>, И.А. Клешнина<sup>3</sup>,  
В.Н. Наговицин<sup>1,2</sup>, А.Ю. Похабов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решётнева»  
г. Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, 660037, Россия

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, 660037, Россия

*Большинство современных космических аппаратов изготавливают из трехслойных сотовых конструкций. Сотовая панель представляет собой слоистую конструкцию из двух несущих слоев и сотового заполнителя. Для установки оборудования, кабелей, волноводных сетей и других компонентов в сотовую панель также вводят закладные элементы. Применение в конструкции космического аппарата закладных элементов обуславливает необходимость учитывать ряд факторов, которые могут повлиять на несущую способность этих элементов. Представлена методика аналитического расчета, с помощью которой проведен расчет несущей способности закладных элементов. Полученные экспериментальные данные имеют практическую значимость, заключающуюся в возможности их использования при проектировании и расчетах сотовых конструкций.*

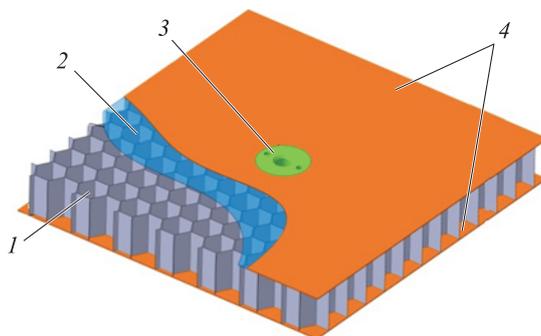
**Ключевые слова:** *трехслойная сотовая конструкция, сотовый заполнитель, закладные элементы, испытания сотовой панели, несущая способность, опорные узлы*

**Введение.** Один из путей достижения весовой эффективности космических аппаратов — изготовление их конструктивных элементов из новых материалов с максимальными удельными характеристиками прочности и жесткости, в частности трехслойных сотовых панелей с алюминиевыми или композитными обшивками. При проектировании и создании сотовых конструкций космических аппаратов был накоплен значительный опыт по разработке и применению опорных узлов. Для более подробного изучения данного направления необходимо проанализировать несущую способность закладных элементов, а также ряд факторов, влияющих на несущую способность, и подтвердить правильность выбранной методики аналитического расчета несущей способности закладных элементов. При анализе несущей способности опорных узлов сотовых конструкций следует учитывать материал обшивок и сотового заполнителя, высоту сотового заполнителя, размеры и конфигурацию ячеек, толщину обшивок и способ установки опорных узлов в сотовую панель. Однако данный вопрос еще недостаточно исследован и представлен в литературных

источниках, а методика расчета несущей способности закладных элементов пока не опубликована.

Основная цель работы — проверка методики аналитического расчета несущей способности сквозного закладного элемента в сотовых панелях.

**Конструкция сотовой панели.** Один из наиболее эффективных путей развития космической техники — внедрение новых конструктивно-технологических решений, в частности использование сотовых конструкций. Сотовая панель состоит из двух тонких несущих обшивок, соединенных между собой сотовым наполнителем [1, 2]. Для распределения нагрузки при креплении сотовых конструкций и увязки интерфейсов используют закладные элементы, выполненные, например, в виде втулки с двумя фланцами. Закладные элементы, имеющие интерфейсные и технологические отверстия, установлены в отверстие сотовой панели и соединены с сотовым наполнителем вспенивающейся клеевой композицией, например пенокомпанудом марки ПЭК-74 [3–5]. Благодаря отделению одного несущего слоя от другого обеспечиваются повышение жесткости конструкции и одновременно уменьшение ее массы. Образец сотовой конструкции с закладным элементом представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема сотовой конструкции:  
1 — сотовый наполнитель; 2 — клеевая пленка;  
3 — закладной элемент; 4 — несущие слои

При проектировании сотовых конструкций необходимо учитывать [6, 7]:

- основные характеристики сотового наполнителя;
- материал и толщину несущих слоев;
- граничные условия, вид соединения, размеры закладных элементов.

**Сотовый наполнитель.** Обладая рядом преимуществ, такой наполнитель широко применяется в космической технике. Он соединяет несущие слои, объединяя трехслойную конструкцию в единое целое.

Заполнитель имеет ячеистую структуру, размеры ячеек значительно меньше размеров сотовой конструкции. Поэтому сотовый заполнитель условно можно считать однородным по объему материалом с заданными упругими свойствами [8]. Его механические характеристики и область применения зависят от толщины стенок, размера и формы сот.

**Несущие слои.** В сотовой конструкции несущие слои могут быть изготовлены как из металлических, так и из неметаллических материалов. Параметры несущих слоев выбирают в зависимости от требуемых значений прочности и жесткости конструкции. В современных конструкциях широко применяют несущие слои из алюминиевых сплавов и композитных материалов [9].

**Закладной элемент.** Закладной элемент является частью разъемного фиксирующего устройства, соединяющего многослойные сотовые конструкции с такими конструктивными элементами, как рамы, профили, кронштейны. Кроме того, эти элементы позволяют устанавливать, например, приборы, линии волноводов, кабели и т. п. [10].

Закладные элементы могут быть съемными и фиксированными. Закладной элемент представляет собой металлическую втулку, которую устанавливают в просверленное в сотовой панели сквозное отверстие и фиксируют пенокомпандом (например, марки ПЭК-74).

В состав разъемного устройства с закладными элементами входят три основных компонента: вставка, многослойная конструкция и герметизирующий (фиксирующий) материал.

Применяемые в конструкции космических аппаратов закладные элементы (рис. 2) проходят квалификационные и приемо-сдаточные испытания. При расчете локальной прочности этих элементов используется значение несущей способности, полученное при квалификационных испытаниях партии образцов или при расчете с учетом принятых коэффициентов безопасности.

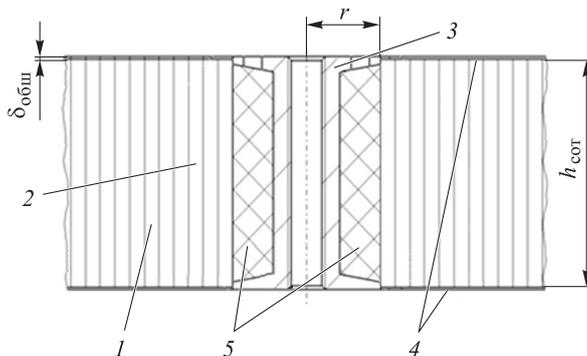


**Рис. 2.** Закладные элементы в виде втулок

**Несущая способность закладного элемента.** Максимальная нагрузка, которую может выдержать закладной элемент без повреждения, называется его несущей способностью. Значение несущей способности сквозного закладного элемента на вырыв (рис. 3) определяется по формуле [11]

$$F_{\text{в}} = 2\pi r_{\text{эф}} h_{\text{р}} \tau_{\text{сот}} + k_0 r_{\text{эф}} \delta_{\text{обш}} \sigma_{\text{обш}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{в}}$  — несущая способность закладного элемента на вырыв, Н;  $r_{\text{эф}}$  — эффективный радиус, мм;  $h_{\text{р}}$  — высота вспенивающегося материала, мм;  $\tau_{\text{сот}}$  — минимальное значение предела прочности сотового заполнителя при сдвиге, Па;  $k_0$  — поправочный коэффициент (в расчетах принят равным 0,65 и затем уточнен в процессе статических испытаний);  $\delta_{\text{обш}}$  — толщина обшивки, мм;  $\sigma_{\text{обш}}$  — допустимый предел прочности материала обшивки, Па.



**Рис. 3.** Закладной элемент:

1 — сотовый заполнитель; 2 — клеевая пленка; 3 — закладной элемент; 4 — несущие слои; 5 — пенокомпунд марки ПЭК-74;  $h_{\text{сот}}$  — высота сотового заполнителя без учета толщины обшивки

Эффективный радиус  $r_{\text{эф}}$  — аналитический размер, описывающий радиальную зону воздействия заливки, определяется как среднее значение расстояния между стенками ближайших ячеек вокруг зоны заливки и центром закладного элемента. Он зависит от радиуса вставки и размера ячейки соты, а свое минимальное значение принимает для конкретного положения центра сквозного закладного элемента внутри шестигранной ячейки. Минимальное значение эффективного радиуса определяется по формуле

$$r_{\text{эф}} = r + 0,6S_{\text{с}}, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус втулки, мм (см. рис. 3);  $S_{\text{с}}$  — размер стороны шестигранника соты, мм; коэффициент 0,6 вычисляется по среднему значению площади заполнения пенокомпунда ПЭК-74.

Значение эффективного радиуса для сотового заполнителя:  
 марки АМг2-Н-3,5-20

$$r_{\text{эф}} = 0,01 + 0,6 \cdot 0,0035 = 0,01021 \text{ м};$$

марок 5052-2,5-23 и 5052-2,5-40

$$r_{\text{эф}} = 0,01 + 0,6 \cdot 0,0025 = 0,0115 \text{ м}.$$

Для металлических обшивок допустимый предел прочности  $\sigma_{\text{обш}} = \sigma_{\text{т}}$  ( $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести материала обшивки, Па); для обшивок из композитных материалов  $\sigma_{\text{обш}} = \sigma_{\text{сж}}$  ( $\sigma_{\text{сж}}$  — минимальный предел прочности композитного материала при сжатии в любом направлении в плоскости обшивки, Па). Основные параметры, полученные при расчете несущей способности закладного элемента по формулам (1) и (2) при  $\sigma_{\text{обш}} = 390 \text{ МПа}$ ,  $h_{\text{сот}} = 30 \text{ мм}$ ,  $r = 10 \text{ мм}$ , приведены в табл. 1

Таблица 1

Значения основных параметров, полученные при расчете несущей способности закладного элемента

$\delta_{\text{обш}}, \text{ мм}$	Сотовый заполнитель				$F_{\text{п}}, \text{ Н}$
	$r_{\text{эф}}, \text{ мм}$	$h_{\text{сот}}, \text{ мм}$	$\tau_{\text{сот}}, \text{ МПа}$	Марка	
0,3	10,21	29,4	0,284	АМг2-Н-3,5-20	1312
0,4	10,21	29,2	0,284		1567
0,5	10,21	29	0,284		1822
0,8	10,21	28,4	0,284		2588
0,3	11,5	29,4	0,588	5052-2,5-23	2059
0,4	11,5	29,2	0,588		2343
0,5	11,5	29	0,588		2626
0,8	11,5	28,4	0,588		3477
0,3	11,5	29,4	0,932	5052-2,5-40	2853
0,4	11,5	29,2	0,932		3132
0,5	11,5	29	0,932		3410
0,8	11,5	28,4	0,932		4244

**Расчет на сдвиг пенокомпанда.** При расчете несущей способности закладного элемента (см. рис. 3) необходимо учитывать влия-

ние пенокомпаунда ПЭК-74. Она определяется способностью сотового заполнителя воспринимать осевую нагрузку, проходящую от закладного элемента через вспенивающий клей.

При нагружении сквозного закладного элемента на вырыв действует сила, которая приводит к деформациям сдвига. При этом важно не только учитывать несущую способность закладного элемента, но и давать оценку по сдвигу пенокомпаунда марки ПЭК-74 и выбирать минимальное значение на основании результатов расчетов и полученных графиков.

Прочность клеевого соединения (ПЭК) на сдвиг определяется по формуле

$$P_c = sF\tau_{\text{пЭК}}, \quad (3)$$

где  $s$  — поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность ПЭК-74 (его выбирают по средней площади заполнения клея, получают по результатам испытаний);  $F$  — площадь клеевого соединения, работающего на сдвиг,  $\text{м}^2$ ;  $\tau_{\text{пЭК}}$  — касательное напряжение при сдвиге, Па,  $\tau_{\text{пЭК}} = 0,5\sigma_{\text{пЭК}}$  ( $\sigma_{\text{пЭК}}$  — прочность клея при сжатии, Па).

Площадь работающего на сдвиг закладного элемента вычисляют так:

$$F = 2\pi rh_{\text{сот}}. \quad (4)$$

Таким образом, значение прочности на сдвиг, рассчитанное по формуле (4), составит

$$P_c = 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,028 \cdot 0,5 \cdot 10\,000\,000 = 4396 \text{ Н.}$$

**Экспериментальное определение несущей способности трехслойной конструкции.** Для исследований несущей способности закладного элемента были использованы образцы, изготовленные согласно конструкторской документации. Представляющие собой трехслойную сотовую конструкцию (рис. 4), экспериментальные образцы были выбраны с одинаковой высотой сотового заполнителя ( $h = 30$  мм) и одинаковым вклеенным закладным элементом ( $r = 20$  мм), но с разной толщиной обшивки  $\delta_{\text{общ}}$ , мм: 0,3; 0,4; 0,5; 0,8.

Цель испытаний — экспериментальное определение несущей способности закладных элементов при испытаниях на вырыв. При воздействии максимальной нагрузки на элемент в месте его установки возникают остаточные деформации несущих слоев или происходит разрушение составных частей. Схема приложения нагрузок при вырыве представлена на рис. 5.

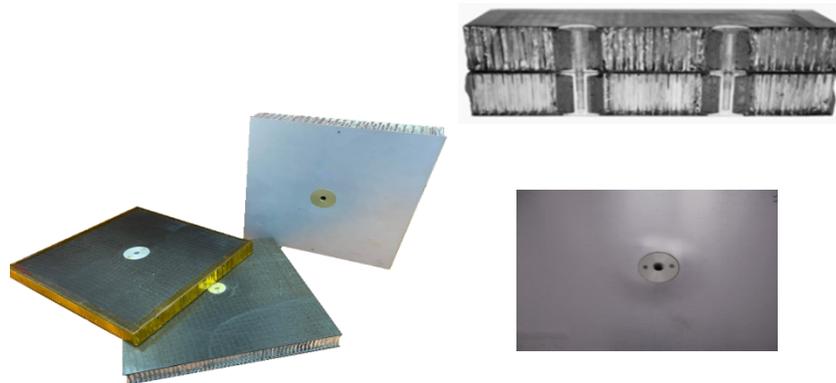


Рис. 4. Общий вид образцов после проведения испытаний

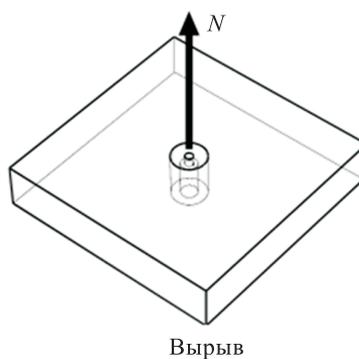
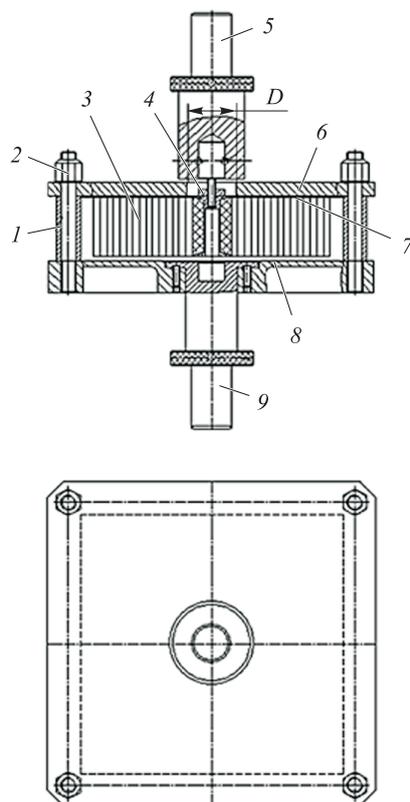


Рис. 5. Схема приложения нагрузок при вырыве для исследуемых образцов

Испытания проводили на универсальной испытательной машине Instrone, предназначенной проведения широкого спектра статических испытаний [12]. При испытаниях на вырыв образец для испытаний устанавливался на оснастке. На рис. 6 представлена схема испытания образцов на вырыв.

При экспериментальном определении несущей способности образца закладного элемента на него в месте установки воздействовала разрушающая нагрузка, при которой начинали возникать остаточные деформации несущих слоев или разрушались составные части образца. Критерием положительной оценки результатов испытаний были полученные значения нагрузки закладного элемента образца в точке начала пластического деформирования. Для сравнения в табл. 2–4 представлены результаты расчетов несущей способности образцов и результаты, полученные при испытаниях.



**Рис. 6.** Схема испытания образца на вырыв:

1 — втулка; 2 — элементы крепления; 3 — образец; 4 — закладной элемент; 5, 9 — верхний и нижний шарнирные захваты-переходники испытательной машины Instron; 6 — сменная опора; 7 — прокладка; 8 — плита-основание

Таблица 2

**Результаты расчетов и испытаний образцов с сотовым наполнителем АМг2-Н-3,5-20**

Толщина обшивки $\delta_{\text{обш}}$ , мм	Значение несущей способности, Н	
	расчетное $F_n$	в результате испытаний
0,3	1285	1296
		1305
		1316
0,4	1535	1546
		1540
		1550
0,5	1785	1789
		1795
		1798
0,8	2535	2538
		2546
		2540

Таблица 3

**Результаты расчетов и испытаний образцов  
с сотовым наполнителем 5052-2,5-23**

Толщина обшивки $\delta_{\text{обш}}$ , мм	Значение несущей способности, Н	
	расчетное $F_{\text{н}}$	в результате испытаний
0,3	2059	2089
		2090
		2085
0,4	2343	2350
		2355
		2356
0,5	2626	2635
		2639
		2629
0,8	3477	3480
		3486
		3490

Таблица 4

**Результаты расчетов и испытаний образцов  
с сотовым наполнителем 5052-2,5-40**

Толщина обшивки $\delta_{\text{обш}}$ , мм	Значение несущей способности, Н	
	расчетное $F_{\text{н}}$	в результате испытаний
0,3	2481	2800
		3050
		2900
0,4	2723	2630
		2790
		2850
0,5	2965	3050
		2978
		2954
0,8	3690	3760
		3600
		3830

Результаты расчетов несущей способности сквозного закладного элемента аналитическим методом на вырыв и сдвиг ПЭК-74 представлены на рис. 7. Проанализировав данные, приведенные на рис. 7, были выбраны значения толщин обшивки, а также с учетом представленных выше расчетов были выбраны классические варианты со-топакетов. Однако на практике часто встречаются случаи, когда используются накладки, поэтому можно сделать выводы и провести анализ полученных результатов для более широкого применения.

Так, сравнив расчетные значения, находящиеся в диапазоне полученных при испытаниях значений, можно прийти к следующему

заклучению. При дальнейших расчетах несущей способности закладного элемента необходимо учитывать величину сдвига ПЭК-74 по закладному элементу для образцов с сотовым наполнителем марки АМг2-Н-3,5-20 с обшивкой толщиной  $\delta_{\text{общ}} \geq 1,4$  мм, марки 5052-2,5-23 с обшивкой толщиной  $\delta_{\text{общ}} \geq 1,1$  мм, марки 5052-2,5-40 с обшивкой толщиной  $\delta_{\text{общ}} \geq 0,8$  мм. Следовательно, дальнейшее увеличение толщины обшивки не приведет к возрастанию несущей способности закладного элемента.

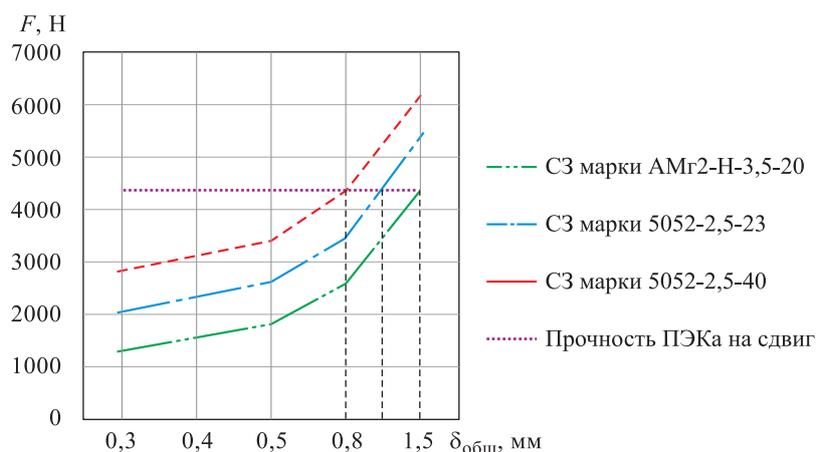


Рис. 7. Результаты расчета несущей способности закладного элемента на вырыв  $F_v$  и на сдвиг  $F_c$  ПЭКа (СЗ — сотовый наполнитель)

**Заклучение.** Было проведено исследование в целях проверки методики аналитического расчета несущей способности сквозного закладного элемента в сотовых панелях, выполнен расчет для цилиндрических закладных элементов с помощью представленной методики. Сравнение значений параметров, полученных в результате испытаний, с расчетными значениями показало целесообразность применения рассмотренной методики при проектировании и изготовлении космических аппаратов.

Полученные экспериментальные данные имеют практическую значимость, их можно использовать в исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании и расчетах конструкций подобных типов при рассматриваемом виде нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чичурин В.Е., Наговицин В.Н., Патраев Е.В., Мациенко А.В., Михнев М.М., Лукина Н.М. Способ установки закладного элемента в трехслойный сотовый рефлектор и методика проверки качества вклеивания. *Новые технологии. Том 2. Материалы XV Всероссийской конференции.* Москва, РАН, 2018, с. 11–21.

- [2] Наговицин В.Н., Чичурин В.Е., Мациенко А.В., Михнев М.М., Похабов А.Ю. Патент на изобретение РФ RU 2742237 C1, МПК В32В 37/00. Заявка 2020115787, 14.05.2020. Оpubл. 03.02.2021.
- [3] Чичурин В.Е., Наговицин В.Н., Мациенко А.В., Михнев М.М., Похабов А.Ю., Романькова И.А. Патент на полезную модель РФ RU 201803 U1, МПК В32В 3/06, В32В 3/12. Заявка 202012595, 31.07.2020. Оpubл. 13.01.2021.
- [4] Марцинкевич Т.Н., Похабов А.Ю., Биндокас К.А., Савицкий В.В. Патент на изобретение РФ RU 2742177 C1, МПК В32В 3/06. Заявка 2020119149, 10.06.2020. Оpubл. 02.02.2021.
- [5] Иванов Е.А., Похабов А.Ю., Наговицин В.Н., Сныткова М.В. Патент на полезную модель РФ RU 201937 U1, МПК В32В 3/06, В32В 3/12. Заявка 2020128905, 01.09.2020. Оpubл. 21.01.2021.
- [6] Наговицин В.Н., Похабов А.Ю., Филимонов И.В., Савицкий В.В., Вашкевич В.П. Патент на полезную модель РФ RU 193643U1, МПК В64В 1/22. Заявка 2019125900, 15.08.2019. Оpubл. 07.11.2019.
- [7] Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем. Москва, Машиностроение, 1991, с. 8–13.
- [8] Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции: Выбор параметров проектирования. Москва, Машиностроение, 1986, с. 8–9.
- [9] Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. Москва, Машиностроение, 1982, с. 22–25.
- [10] Bianchi G., Aglietti G.S., Richardson G. Static performance of hot bonded and cold insert in honeycomb panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2011, vol. 13, iss. 1, pp. 59–65.
- [11] Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермяков М.Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 1, с. 200–211.
- [12] Аксалит. URL: <https://axalit.ru/catalog/ispitatelnye-mashiny-universalnye-ispitatelnye-mashiny/ispitatelnye-mashiny-serii-instron> (дата обращения: 03.02.2020).

Статья поступила в редакцию 28.12.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Иванов Е.А., Иконникова А.А., Клешнина И.А., Наговицин В.Н., Похабов А.Ю. Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2177>

**Иванов Ефим Анатольевич** — аспирант, инженер отдела прочности АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Область научных интересов: исследование многослойных конструкций.  
e-mail: LLaX-95@mail.ru.

**Иконникова Анастасия Александровна** — инженер отдела конструирования космических аппаратов и модуля полезных нагрузок АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Область научных интересов: силовые конструкции космических аппаратов.  
e-mail: ikonnikovaaa@iss-reshetnev.ru

**Клешина Ирина Александровна** — аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнёва. Область научных интересов: конструкция космических аппаратов. e-mail: Kleshnina.ira@gmail.com

**Наговицин Василий Николаевич** — канд. техн. наук, главный специалист по прочности антенных систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Область научных интересов: механика композитных материалов. e-mail: nvn@iss-reshetnev.ru

**Похабов Александр Юрьевич** — инженер отдела конструирования космических аппаратов и модуля полезных нагрузок АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Область научных интересов: силовые конструкции космических аппаратов. e-mail: pokhabov@iss-reshetnev.ru

## **Application of honeycomb panel structures in spacecraft**

© E.A. Ivanov<sup>1,3</sup>, A.A. Ikonnikova<sup>1</sup>, I.A. Kleshnina<sup>3</sup>,  
V.N. Nagovitsin<sup>1,2</sup>, A.Yu. Pokhabov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC Information Satellite Systems Reshetnev,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsky Region, 662972, Russia

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660037, Russia

<sup>3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, 660037, Russia

*Most modern spacecraft are made of three-layer honeycomb panels which are layered structures consisting of two carrier layers and a honeycomb core. When equipment, cables, waveguide networks are installed, a panel has inserts as well. For a spacecraft design to use inserts, it should account for various factors that can affect the bearing capacity of an insert. The study investigates the influence of these factors, tests the method of analytical calculation, and carries out the calculation of inserts. The practical importance of the experimental data obtained makes it possible to use them in honeycomb structures design and calculations.*

**Keywords:** *three-layer honeycomb structure, honeycomb core, inserts, honeycomb panel test, bearing capacity, reference assemblies*

### REFERENCES

- [1] Chichurin V.E., Nagovitsin V.N., Patraev E.V., Matsienko A.V., Mikhnev M.M., Lukina N.M. Sposob ustanovki zakladnogo elementa v trekhsloynny sotovy reflektor i metodika proverki kachestva vkleivaniya [The method of installing the embedded element in a three-layer cellular reflector and the method of checking the quality of gluing]. *Novye tekhnologii, tom 2. Materialy XV Vserossiyskoy konferentsii* [New Technologies, vol. 2. Proceedings of the XV All-Russian Conference]. Moscow, RAS, 2018, pp. 11–21.
- [2] Nagovitsin V.N., Chichurin V.E., Matsienko A.V., Mikhnev M.M., Pokhabov A.Yu. Sposob izgotovleniya sotovoy paneli [Honeycomb panel manufacturing method]. Patent RF, no. 2742237, 2020. Publ. 2021/02/03.
- [3] Chichurin V.E., Nagovitsin V.N., Matsienko A.V., Mikhnev M.M., Pokhabov A.Yu., Romankova I.A. Patent RF, no. 201803, 2020. Publ. 2021/01/013.
- [4] Martsinkevich T.N., Pokhabov A.Yu., Bindokas K.A., Savitskiy V.V. Oporny uzel sotovoy paneli [Honeycomb support assembly]. Patent RF, no. 2742177, 2020. Publ. 2021/02/02.
- [5] Ivanov E.A., Pokhabov A.Yu., Nagovitsin V.N., Snytkova M.V. Patent RF, no. 201937, 2020. Publ. 2021/01/21.
- [6] Nagovitsin V.N., Pokhabov A.Yu., Filimonov I.V., Savitskiy V.V., Vashkevich V.P. Patent RF, no. 193643, 2019. Publ. 2019/11/07.
- [7] Panin V.F., Gladkov Yu.A. *Konstruktsii s zapolnitelem* [Sandwich structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, pp. 8–13.
- [8] Endogur A.I., Vaynberg M.V., Ierusalimskiy K.M. *Sotovye konstruktsii: vybor parametrov proektirovaniya* [Honeycomb structures: choice of design parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, pp. 8–9.
- [9] Panin V.F. *Konstruktsii s sotovym zapolnitelem* [Honeycomb structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, pp. 22–25.

- [10] Bianchi G., Aglietti G.S., Richardson G. Static performance of hot bonded and cold insert in honeycomb panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 59–65.
- [11] Testoedov N.A. Nagovitsin V.N, Permyakov M.Yu. *Vestnik SibGAU — Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 200–211.
- [12] *Aksalit* [Axalit]. Available at: <https://axalit.ru/catalog/ispitatelnye-mashiny-universalnye-ispitatelnye-mashiny/ispitatelnye-mashiny-serii-instron> (accessed February 3, 2020).

**Ivanov E.A.**, post-graduate student, engineer, Strength Department, JSC Information Satellite Systems Reshetnev. Research interests: mechanics of multilayer structures. e-mail: LLlax-95@mail.ru

**Ikonnikova A.A.**, engineer, Spacecraft and Payload Module Design Department, JSC Information Satellite Systems Reshetnev. Research interests: spacecraft power structures. e-mail: LLlax-95@mail.ru

**Kleshnina I.A.**, post-graduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: spacecraft design. e-mail: LLlax-95@mail.ru

**Nagovitsin V.N.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist for the strength of antenna systems, JSC Information Satellite Systems Reshetnev. Research interests: mechanics of composite materials. e-mail: nvn@iss-reshetnev.ru

**Pokhabov A.Yu.**, engineer Spacecraft and Payload Module Design Department, JSC Information Satellite Systems Reshetnev. Research interests: spacecraft power structures. e-mail: pokhabov@iss-reshetnev.ru