

УДК 67.02

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397

Для цитирования: Руденко М. С., Михеев А. Е., Гирн А. В. Технология изготовления сотовых заполнителей из полимерных композиционных материалов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 391–397. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397.

For citation: Rudenko M. S., Mikheev A. E., Girn A. V. Manufacturing technology honeycomb core from polymeric composite materials. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 391–397. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-391-397.

Технология изготовления сотовых заполнителей из полимерных композиционных материалов

М. С. Руденко, А. Е. Михеев, А. В. Гирн

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com

Сотовый заполнитель является неотъемлемой частью трехслойных панелей космических аппаратов. На данный момент используют сотовый заполнитель из алюминиевых сплавов. Предложенная технология позволяет заменить материал сотового заполнителя с алюминиевых сплавов на полимерные композиционные материалы (ПКМ). Основное отличие разработанной технологии изготовления сотового заполнителя RTM-методом заключается в том, что за период формования композиционного материала происходит склейка гофролента. В существующих методах изготовления сотовых заполнителей из ПКМ это является отдельным процессом. В данной работе представлены результаты создания опытного образца сотового заполнителя RTM-методом, разработан технологический процесс.

Ключевые слова: сотовый заполнитель, полимерный композиционный материал, RTM-метод.

Manufacturing technology honeycomb core from polymeric composite materials

M. S. Rudenko A. E. Mikheev, A. V. Girn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com

The honeycomb core is an integral part of the spacecraft's sandwich panel. Currently, use of aluminum honeycomb core in sandwich constructions. The proposed technology makes it possible to replace the honeycomb filler material from aluminum with a polymer composite material (PCM). The main difference between the developed technology for the production of honeycomb filler by the RTM method is that corrugated tape is glued during the formation of the composite material. This is a separate process in the existing methods for the production of honeycomb cores from PCM. This paper presents the results of creating a prototype of a honeycomb filler by the RTM-method, a technological process has been developed.

Keywords: honeycomb filler, polymer composite material, RTM method.

Введение

Трехслойная конструкция (ТК) является одним из основных силовых элементов современных космических аппаратов (КА). ТК состоит из двух несущих слоев, заполнителя, расположенного между несущими слоями, и элементов каркаса. Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Главная особенность трехслойной конструкций с заполнителем состоит в том, что в результате разнесения несущих слоев на некоторое расстояние друг от друга достигается большее отношение жесткости конструкции к ее массе [1–6].

В настоящее время в элементах КА наиболее широко используются сотовые заполнители из алюминиевых сплавов, это связано с простотой их производства и дешевизной, но у них есть недостатки, связанные с прочностными и физико-химическими характеристиками [7–12]. Также в качестве материала для сотовых заполнителей используют полимерные композиционные материалы (ПКМ). На данный момент существуют несколько технологий изготовления сотового заполнителя из ПКМ:

1) растяжка склеенного пакета – метод заключается в склеивании сухих армирующих слоев, растяжки их в технологическом устройстве для получения формы сотовой ячейки, окунание в связующий материал, сушка и полимеризация в печи. Данным методом можно производить большое количество изделий сотового заполнителя, которые в основном применяют в самолето- и вертолетостроении. Прецизионные характеристики данного сотового заполнителя не подходят для использования его в космической технике;

2) склейка гофрированных листов – метод заключается в изготовлении единичной или двойной гофрополосы в шестигранной формовочной оснастке и склейке их между собой в печи. Данный метод имеет небольшую эффективность и требует большого количества вспомогательного оборудования;

3) метод объемного ткачества – метод похож на метод растяжкой склеенного пакета с тем отличием, что сотовый пакет образуется не склеиванием листов, а ткачеством на челночном ткацком станке Жаккара. В результате слои скрепляются между собой путем переплетения нитей вдоль линий в шахматном порядке в зависимости от слоя [13–15].

Экспериментальная часть

Целью работы является разработка схемы процесса и технология изготовления сотового заполнителя из ПКМ методом RTM (Resin Transfer Molding). RTM метод заключается в укладке сухого армирующего наполнителя в специальную герметичную форму, внутренние поверхности которой повторяют внешнюю поверхность изделия (в пропитке наполнителя смолы под давлением), и полимеризации в форме. Метод RTM обладает следующими преимуществами в сравнении с остальными методами: возможность изготавливать детали сложной формы; жесткий допуск на размеры; механические свойства сравнимы с автоклавным формованием; высокая производительность.

Предложена схема и разработан технологический процесс изготовления сотового заполнителя из ПКМ (рис. 1).

Армирующий материал 2 (рис. 2) выкраивают по размерам изделия, с учетом кривизны сотовой полосы. На шестигранную поверхность 1 укладывается сухой армирующий материал 2 (стеклоткань, углеткань). Первый слой волокна 2 прижимается жесткими гексагональными стержнями 3. Поверх укладывается следующий слой волокна 2 и аналогично прижимается стержнями 3. Так повторяется до полной загрузки конструкции. Последний слой прижимается крышкой к гексагональной поверхности 4.

Чтобы уменьшить внутреннее напряжение сухого армирующего материала при укладке, он формируется таким образом, чтобы плотно соприкасаться с шестигранной поверхностью. Так происходит до полной загрузки оснастки. Конструкция закрывается боковыми крышками и герметизируется, далее в нее под давлением подается связующее, которое пропитывает волокна.

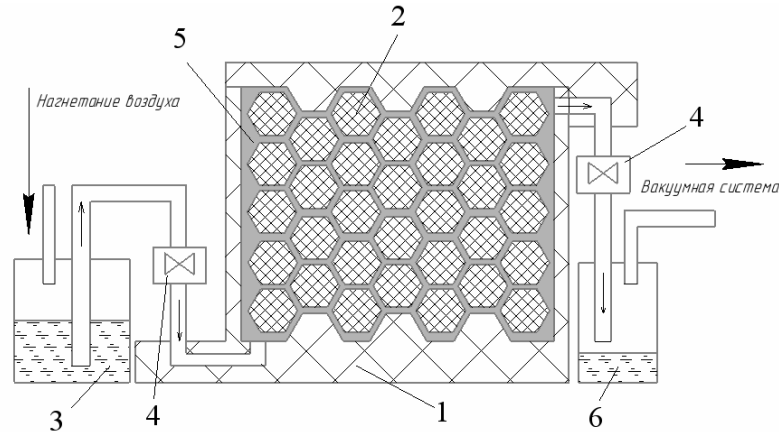


Рис. 1. Схема изготовления сотового заполнителя из ПКМ методом RTM:
 1 – корпус конструкции; 2 – гексагональный стержень; 3 – емкость со связующим; 4 – запорное устройство;
 5 – зона пропитки сухого армирующего материала связующим; 6 – ёмкость для излишек связующего

Fig. 1. Scheme of manufacturing a honeycomb core from PCM using the RTM method:
 1 – structure body; 2 – hexagonal rod; 3 – a container with a binder; 4 – locking device; 5 – zone of impregnation
 of dry reinforcing material with a binder; 6 – capacity for excess binder

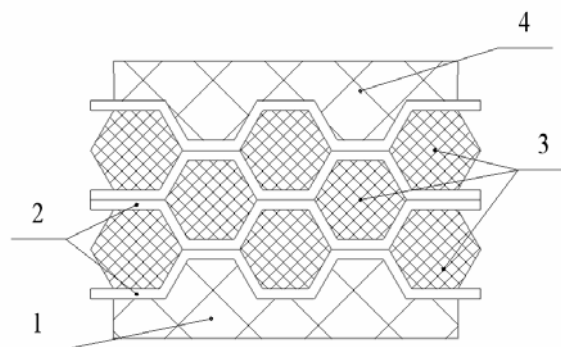


Рис. 2. Схема укладки сухого армирующего материала:
 1, 4 – шестигранные поверхности; 2 – армирующий материал; 3 – гексагональные стержни

Fig. 2. Laying scheme for dry reinforcing material:
 1, 4 – hexagonal surfaces; 2 – reinforcing material; 3 – hexagonal rods

Для изготовления опытного образца сотового заполнителя спроектирована и сконструирована технологическая оснастка (рис. 3), которая состоит из корпуса, боковых крышек и множества гексагональных стержней (вставок). Конструкция оснастки должна обеспечивать:

- 1) жесткость и прочность;
- 2) герметизацию внутренней полости;
- 3) антиадгезионные свойства.

Оснастка была изготовлена на 3D-принтере «Hercules 2018». Материал печати: пластик PETG. Диаметр сопла 0,5 мм. Высота слоя 0,15 мм.

В качестве материала опытного образца сотового заполнителя выбраны:

- армирующий материал – стеклоткань Т-11 (ГОСТ 19170–2001);
- связующие – эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587–84) с отвердителем холодного затвердевания ЭТАЛ-45 (ТУ 2257-045-18826195-01).

Технологический процесс изготовления опытного образца состоит из следующих этапов:

Нанесение слоя разделительно воска на оснастку для обеспечения антиадгезионных свойств.

Раскрой армирующего материала.

Укладка в корпус оснастки армирующего материала с прижатием гексагональными стержнями.

Установка верхней и двух боковых крышек.

Герметизация оснастки.

Подключение вакуумной системы, для подачи эпоксидной смолы в оснастку.

Подготовка смолы и подача ее под давлением в конструкцию.

Время полимеризации смолы в оснастке (24 часа).

Изъятие сотового блока из конструкции оснастки.

Обработка на шлифовальном станке для удаления излишка смолы с торцов изделия.

Изъятие шестигранных стержней из сотового блока, отделка.

В итоге, изготовлен опытный образец сотового заполнителя (рис. 4), который подтверждает реализуемость технологии.

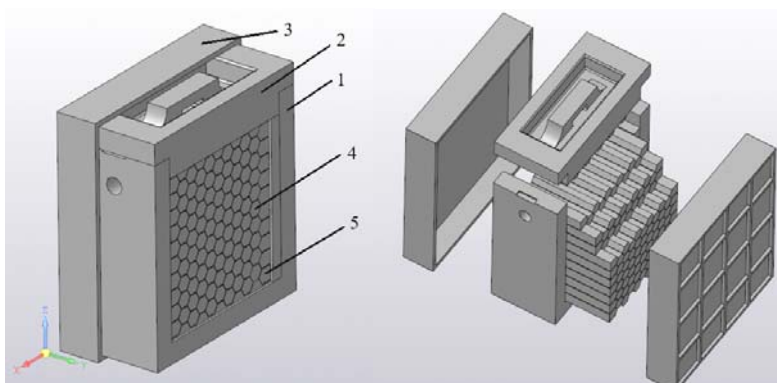


Рис. 3. Технологическая оснастка:

1 – корпус оснастки; 2 – верхняя крышка; 3 – боковая крышка;
4 – гексагональный стержень; 5 – боковой стержень

Fig. 3. Technological equipment:

1 – tooling body; 2 – top cover; 3 – side cover; 4 – hexagonal rod; 5 – side bar

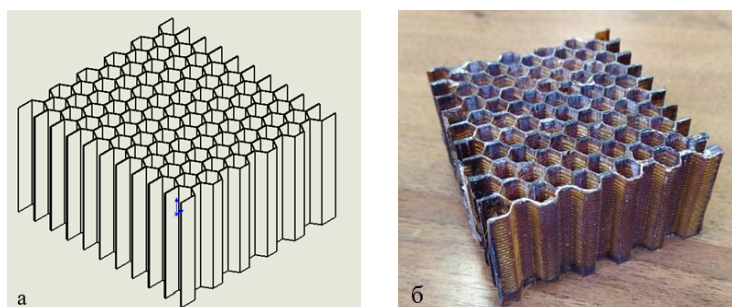


Рис. 4. Сотовый заполнитель из ПКМ:

а – модель; б – опытный образец

Fig. 4. PCM honeycomb core:

а – model; б – prototype

Характеристики опытного образца представлены в таблице. Масса опытного образца 45,03 г, объемная масса составляет 220 кг/м³.

Характеристики опытного образца

Характеристика	Опытный образец
Форма ячейки	Шестигранник
Размер СЗ:	
– длина, мм	73
– ширина, мм	70
– высота, мм	40
Размер ячейки, мм	8
Масса, г	45,03
Объем, м ³	2·10 ⁻⁴
Объемная масса, кг/м ³	220,15
Масса наполнителя, г	21,834
Объемная доля наполнителя, %	38

Заключение

Результаты работы показывают, что предложенным методом, можно изготавливать сотовые наполнители не только с шестигранной ячейкой, а также с множеством различных вариаций форм. Форма и размер ячейки будут зависеть только от формы и размера вкладыша. При использовании технологии растяжки сотопакета добиться этого невозможно.

Также можно изготавливать сотовые наполнители с различной кривизной и устанавливать закладные элементы на этапе формовки, тем самым не клеивать их в готовую деталь.

В итоге была разработана технология изготовления сотовых наполнителей из полимерных композиционных материалов RTM-методом. Данный метод можно адаптировать для серийного производства промышленных изделий.

Библиографические ссылки

1. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с наполнителем : справочник. М. : Машиностроение, 1991. 272 с.
2. Халиулин В. И., Шапаев И. И. Технология производства композитных изделий : учеб. пособие Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003.
3. Achilles Petras Design of Sandwich Structures : dissertation, Doctor of Philosophy. Cambridge University Engineering Department. 1998. P. 5–7.
4. Грабин Б. В. Инженерные основы конструирования космических аппаратов / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. М. Алифанова. М. : МАИ, 2018. 255 с.
5. Тестоедов Н. А., Наговицкий В. Н., Пермяков М. Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 1. С. 200–211.
6. Ендогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. М. Сотовые конструкции: выбор параметров и проектирование. М. : Машиностроение, 1986. 192 с.
7. Расчет соотношения компонентов препрега марки ВПС-53/120, определение физико-механических и эксплуатационных характеристик стеклопластика / Д. А. Мельников, А. П. Петров, А. А. Громова и др. // ТРУДЫ ВИАМ. 2019. № 1 (73). С. 92–104.
8. Уракова А. С., Наговицин В. Н. Применение сотовых панелей в спутниковой технике // Решетневские чтения. 2018. С. 179–180.

9. Особенности изготовления трехслойных сотовых панелей с полимерным наполнителем горячего отверждения / В. Т. Минаков, В. И. Постнов, Н. И. Швец. и др. // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 4 (12). С. 15–18.

10. Злотенко В. В., Ишенина Н. Н. Особенности механической обработки алюминиевых сотовых конструкций // *Вестник СибГАУ*. 2005. № 6. С. 209–211.

11. Сливинский В. И., Ткаченко Г. В., Сливинский М. В. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах // *Вестник СибГАУ*. 2005. № 6. С. 169–173.

12. Иванов А. А., Кашин С. М., Семенов В. И. Новое поколение сотовых наполнителей для авиационно-космической техники. М. : Энергоатомиздат, 2000. 584 с.

13. Першин А. М. Расчётное исследование статической устойчивости сотовых наполнителей из композиционных материалов // *Вестник Самарского гос. аэрокосмич. ун-та*. 2014. № 5 (47). Ч. 1. С. 118–123.

14. Патент № 2651012 Российская Федерация, МПК В32В 3/12 (2006.01). Способ изготовления сотовых наполнителей / А. М. Крюков, В. С. Волкова, Ю. Г. Мурашкин и др. ; заявитель АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А. Г. Ромашина». № 2017108041 ; заявл. 10.03.2017 ; опубл. 18.02.2018. 9 с.

15. Патент № 2680571 Российская Федерация, МПК E04C 2/24 (2006.01), В32В 3/12 (2006.01). Способ изготовления трехслойных панелей сложной кривизны / А. М. Крюков, В. С. Волкова, Ю. Г. Мурашкин и др. ; заявитель АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А. Г. Ромашина». – № 2018112189 ; заявл. 04.04.2018 ; опубл. 22.02.2019. 8 с.

References

1. Panin V. F., Gladkov Yu. A. *Konstruktsii s zapolnitelem* [Constructions with filler]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 272 p.

2. Khaliulin V. I., Shapaev I. I. *Tekhnologiya proizvodstva kompozitnykh izdeliy* [Technology of production of composite products]. Kazan', Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta Publ., 2003.

3. Achilles Petras Design of Sandwich Structures : Doct. Diss. 1998. P. 5–7.

4. Grabin B. V. *Inzhenernye osnovy konstruirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Engineering bases of spacecraft design]. Moscow, MAI Publ., 2018, 255 p.

5. Testoedov N. A., Nagovitskin V. N., Permyakov M. Yu. [The use of three-layer honeycomb structures in spacecraft]. *Vestnik SibSAU*. 2016, Vol. 17, No. 1, P. 200–211 (In Russ.).

6. Endogur A. I., Vainberg M. V., Ierusalimsky K. M. *Sotovye konstruktsii: Vybore parametrov i proektirovanie* [Cellular structures: choice of parameters and design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 192 p.

7. Melnikov D. A., Petrov A. P., Gromova A. A. et al. [Calculation of the ratio of the components of the prepreg brand VPS-53/120, determination of the physical-mechanical and operational characteristics of fiberglass]. *TRUDY VIAM*. 2019, No. 1 (73), P. 92–104 (In Russ.).

8. Urakova A. S., Nagovitsin V. N. [Application of cellular panels in satellite technology]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. 2018, P. 179–180 (In Russ.).

9. Minakov V. T., Postnov V. I., Shchvets N. I. et al. [Features of manufacturing three-layer honeycomb panels with a polymer filler of hot curing]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2009, No. 4 (12), P. 15–18 (In Russ.).

10. Zlotenko V. V., Ishenina N. N. [Features of mechanical processing of aluminum honeycomb structures] *Vestnik SibSAU*. 2005, No. 6, P. 209–211 (In Russ.).

11. Slivinsky, V. I., Tkachenko, G. V., Slivinsky M. V. [Efficacy of cell structures in aircraft]. *Vestnik SibSAU*. 2005, No. 6, P. 169–173 (In Russ.).
12. A. A. Ivanov, S. M. Kashin, V. I. *Semenov* *Novoe pokolenie sotovykh zapolniteley dlya aviat-sionno-kosmicheskoy tekhniki* [New generation of cell aggregates for aerospace engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000, 584 p.
13. Pershin A. M. [Computational study of static stability of cellular aggregates made of composite materials]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2014, No. 5 (47), chast' 1, P. 118–123 (In Russ.).
14. Kryukov A. M., Volkova V. S., Murashkin Yu. G. et al. *Sposob izgotovleniya sotovykh zapol-niteley* [Method of manufacturing honeycomb fillers]. Patent RF, No. 2651012, 2018.
15. Kryukov A. M., Volkova V. S., Murashkin Yu. G. et al. *Sposob izgotovleniya trekhsloynnykh paneley slozhnoy krivizny* [Method of manufacturing three-layer panels of complex curvature]. Patent RF, No. 2680571, 2018.

© Руденко М. С., Михеев А. Е., Гирн А. В., 2021

Руденко Михаил Сергеевич – ассистент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Rudenko Mikhail Sergeevich – Assistant; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Mikheev Anatoly Yegorovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Girn Alexey Vassilyevich – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.
