

УДК 621.9.06-529:004.94:678.078

doi: 10.32620/aktt.2021.1.02

Б. УСПЕНСКИЙ¹, К. АВРАМОВ¹, И. ДЕРЕВЯНКО², И. БИБЛИК¹¹ *Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина*² *Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина*

К РАСЧЕТУ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ FDM

Сотовый наполнитель моделируется гомогенной ортотропной средой. Механические характеристики этой среды определяются моделированием напряженно-деформируемого состояния сотового наполнителя в коммерческом программном комплексе ANSYS. Анализу подвергается классический шестигонный сотовый наполнитель. Другие виды сотовых наполнителей в этой работе не рассматриваются. Полученная в результате гомогенизации среда обладает ортотропными механическими характеристиками. Сотовый наполнитель напечатан из поликарбоната, который является ортотропным материалом. Предложенный в этой работе подход может применяться для других материалов, пригодных для 3D печати. Механические характеристики этого материала сот экспериментально определены для напечатанных с помощью FDM технологий образцов. В результате шести конечно-элементных расчетов части ячейки сотового наполнителя определяется матрица закона Гука. Для определения разных компонент этой матрицы часть ячеек сотового наполнителя по-разному нагружается и по-разному закрепляется. Для расчета упругих характеристик сот рассматривается четвертая часть одной ячейки соты. Четвертая часть одной соты моделируется в ANSYS. Для расчета механических характеристик область вокруг участка соты дополняется до куба «упругим воздухом». Он является изотропным материалом с малым модулем упругости. При проведении вычислительных экспериментов стороны куба подвергались постоянному смещению и. Различных вариантов таких смещений шесть. В результате численного моделирования определяются элементы тензора напряжений, усредненные по объему конечного элемента. В результате расчетов получаем набор девяти технических констант гомогенной ортотропной среды. При численном моделировании напряженно-деформированного состояния участка соты проводился анализ сходимости результатов расчета с помощью сгущения конечно-элементной сетки. Анализ сходимости показал, что 1745481 объемных конечных элементов достаточно для дискретизации кубической области.

Ключевые слова: сотовый наполнитель; гомогенная среда; напряженно-деформируемое состояние; метод конечных элементов.

Введение

Хорошо известно, что трехслойные тонкостенные конструкции с сотовым наполнителем широко используются в аэрокосмической технике [1]. В последние годы появились публикации, где описывается использование аддитивных технологий FDM для изготовления сотовых наполнителей [2–4]. В ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» также прорабатывается возможность изготовления сотовых наполнителей с помощью аддитивных технологий. Настоящая статья возникла из этой работы.

В трехслойных конструкциях сотовые наполнители описываются ортотропным гомогенизированным сплошным слоем [5, 6]. Серия работ направлена на расчет механических характеристик гомогенизированного сплошного слоя. В статьях [7–9] сото-

вый наполнитель представлялся как балочная конструкция. Большинство сотовых наполнителей имеют малые по размерам высокие ячейки, которые не могут быть описаны стержневой теорией. В большинстве современных работ для моделирования упругих характеристик сотовых наполнителей используются конечно-элементные модели [10–12]. В этой статье предложен подход для расчета механических характеристик сотовых наполнителей, напечатанных с помощью аддитивных технологий FDM.

1. Постановка задачи и подход к ее решению

Сотовый наполнитель моделируется гомогенной средой. Механические характеристики этой среды определяются моделированием напряженно-

деформируемого состояния сотового заполнителя в коммерческом программном комплексе ANSYS с помощью подхода, предложенного в [10]. Сотовый заполнитель (рис. 1) рассматривается в декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 . Анализу подвергается классический шестиугольный сотовый заполнитель. Полученная в результате гомогенизации среда обладает ортотропными механическими характеристиками.

Рассмотрим равномерный шестиугольный сотовый заполнитель с постоянной толщиной стенки h_c (рис. 2). Высоту сотового слоя обозначим l_c . Сотовый заполнитель напечатан из поликарбоната, который является ортотропным материалом. Механические характеристики этого материала сот экспериментально определены в [13] для напечатанных с помощью FDM технологий образцов.

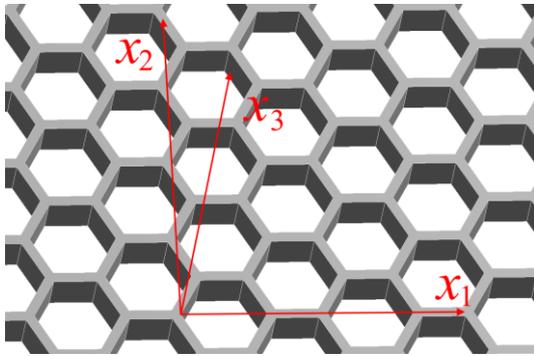


Рис. 1. Эскиз сотового заполнителя

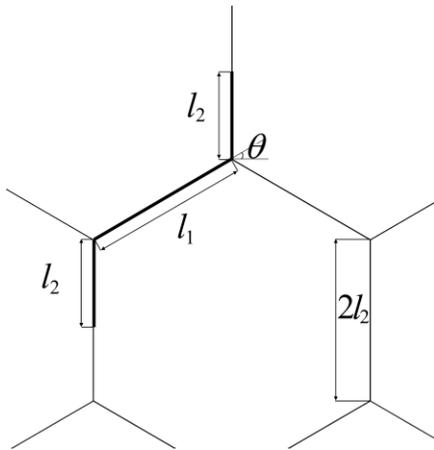


Рис. 2. Эскиз ячейки сотового заполнителя

Этот материал имеет следующие численные значения механических характеристик:

$$\begin{aligned} E_{11} &= 1,46 \text{ ГПа}; E_{22} = 1,68 \text{ ГПа}; E_{33} = 1,59 \text{ ГПа}; \\ v_{12} &= 0,39; v_{23} = 0,38; v_{13} = 0,37; G_{12} = 506 \text{ МПа}; \\ G_{23} &= 591 \text{ МПа}; G_{13} = 633 \text{ МПа}; \rho = 2700 \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим подход к определению механических характеристик ортотропной гомогенной среды,

которой описывается сотовый заполнитель. В результате шести конечно-элементных расчетов части ячейки сотового заполнителя определяется матрица C закона Гука

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^{(c)} \\ \sigma_{yy}^{(c)} \\ \sigma_{zz}^{(c)} \\ \sigma_{yz}^{(c)} \\ \sigma_{xz}^{(c)} \\ \sigma_{xy}^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(c)} \\ \varepsilon_{yy}^{(c)} \\ \varepsilon_{zz}^{(c)} \\ 2\varepsilon_{yz}^{(c)} \\ 2\varepsilon_{xz}^{(c)} \\ 2\varepsilon_{xy}^{(c)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\sigma_{xx}^{(c)}, \sigma_{yy}^{(c)}, \sigma_{zz}^{(c)}, \sigma_{yz}^{(c)}, \sigma_{xz}^{(c)}, \sigma_{xy}^{(c)}$ – элементы тензора напряжений гомогенной среды;

$\varepsilon_{xx}^{(c)}, \varepsilon_{yy}^{(c)}, \varepsilon_{zz}^{(c)}, \varepsilon_{yz}^{(c)}, \varepsilon_{xz}^{(c)}, \varepsilon_{xy}^{(c)}$ – элементы тензора деформаций этой среды.

Элементы матрицы C_{11}, C_{12}, \dots получаются в результате конечно-элементного расчета в коммерческом программном пакете ANSYS и процедурой гомогенизации. В соотношениях (2) учитывается симметрия ячейки сотового заполнителя (см. рис. 1). Для определения разных компонент матрицы C часть ячеек сотового заполнителя по-разному нагружается и по-разному закрепляется. Матрица, обратная C , связана с инженерными константами гомогенизированного материала так [14]:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{23}, G_{13}, G_{12}$ – модули Юнга и модули сдвига гомогенизированного материала; $\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}, \nu_{32}$ – коэффициенты Пуассона.

Используя уравнение (3) и уравнение

$$E_{ij}\nu_{ij} = \nu_{ji}E_{ii}, \quad i, j = 1 \dots 3, \quad i \neq j,$$

можно определить все 9 инженерных констант.

Для расчета упругих характеристик сот рассматривается четвертая часть одной ячейки соты, которая показана жирными линиями на рис. 2. Четвертая часть одной соты моделируется в ANSYS. Она показана на рис. 3. Для расчета механических характеристик область вокруг участка соты дополняется до куба «упругим воздухом». Он является изотропным материалом с малым модулем упругости. Размеры куба a_1 , a_2 , a_3 (см. рис. 3) легко рассчитываются из геометрии сот, которая приведена на рис. 2.

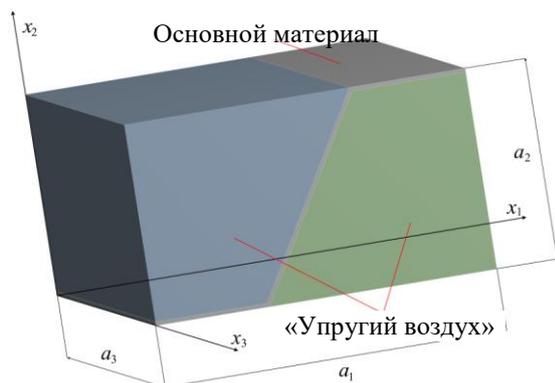


Рис. 3. Объёмный элемент сотового заполнителя

Для конечно-элементной дискретизации области используются трехмерные конечные элементы. Трёхмерные конечно-элементные модели имеют значительно более высокую точность при расчете модуля сдвига G_{12} . В этом случае получается значительно более точная модель напряжённо-деформированного состояния сотового заполнителя в области стыка стенок.

При проведении вычислительных экспериментов стороны куба (рис. 3) подвергались постоянному смещению u . Различных вариантов таких смещений шесть. Способы задания этих смещений и граничные условия для расчетов 1–6 приведены в табл. 1, 2. В верхних строках таблиц показаны номера проводимых расчетов для получения упругих характеристик. Во вторых строках таблиц приведены соответствующие перемещения вдоль осей x_1 , x_2 , x_3 (см. рис. 3), которые обозначаются через U_1 , U_2 , U_3 . Как видно из табл. 1, 2, перемещения сторон куба (см. рис. 3) задаются трех видов u ; 0 и free. Обозначения u ; 0 показывают величину соответствующих перемещений всей стороны куба. Обозначение free показывает, что перемещения соответствующей стороны произвольны и ничем не ограничиваются. В первых столбцах таблиц показываются грани, на которых задаются соответствующие перемещения. В последних строках таблиц показываются соотношения, по которым рассчитываются деформации в части соты.

В результате численного моделирования определяются элементы тензора напряжений, усреднённые по объёму конечного элемента. Величины усредненных напряжений в четвертой части соты рассчитываются так:

$$\sigma_{ij}^{(c)} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N_f} \bar{\sigma}_{ij}^{(k)} v_k; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где номера i, j соответствуют номерам осей x, y, z уравнения (2);

V – объём части соты;

N_f – число конечных элементов;

$\bar{\sigma}_{ij}^{(k)}$ – усреднённое значение напряжения в k -ом

конечном элементе;

v_k – объём k -го конечного элемента.

Таблица 1

Условия расчетов 1–3

	Расчет 1			Расчет 2			Расчет 3		
Грань	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
$x_1=0$	0	Free	Free	0	Free	Free	0	Free	Free
$x_1=a_1$	u	Free	Free	0	Free	Free	0	Free	Free
$x_2=0$	Free	0	Free	Free	0	Free	Free	0	Free
$x_2=a_2$	Free	0	Free	Free	u	Free	Free	0	Free
$x_3=0$	Free	Free	0	Free	Free	0	Free	Free	0
$x_3=a_3$	Free	Free	0	Free	Free	0	Free	Free	U
Деформация	$\varepsilon_1 = \frac{u}{a_1}$			$\varepsilon_2 = \frac{u}{a_2}$			$\varepsilon_3 = \frac{u}{a_3}$		

Таблица 2

Условия расчетов 4–6

	Расчет 4			Расчет 5			Расчет 6		
Грань	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
$x_1=0$	0	Free	Free	Free	0	0	Free	0	0
$x_1=a_1$	0	Free	Free	Free	0	0	Free	0	0
$x_2=0$	0	Free	0	Free	0	Free	0	Free	0
$x_2=a_2$	0	Free	0	Free	0	Free	u	0	0
$x_3=0$	0	0	Free	0	0	Free	Free	Free	0
$x_3=a_3$	0	u	0	u	0	0	Free	Free	0
Деформация	$\varepsilon_4 = \frac{u}{a_3}$			$\varepsilon_5 = \frac{u}{a_3}$			$\varepsilon_6 = \frac{u}{a_2}$		

Элементы матрицы C уравнения (2) рассчитываются из следующих соотношений:

$$C_{ij} = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_j}; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad C_{ii} = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad i = 4, 5, 6.$$

В этих соотношениях приняты следующие обозначения:

$$[\sigma_1, \dots, \sigma_6] = [\sigma_{xx}^{(c)}, \sigma_{yy}^{(c)}, \sigma_{zz}^{(c)}, \sigma_{yz}^{(c)}, \sigma_{xz}^{(c)}, \sigma_{xy}^{(c)}].$$

Итак, из расчетов 1–3 (см. табл. 1) определяют элементы матрицы C_{ij} ; $i, j=1, 2, 3$. Из расчетов 4–6 определяются элементы матрицы C_{ii} ; $i=4, 5, 6$.

3. Численное моделирование

Тестирование этого подхода проводилось на расчете алюминиевого сотового заполнителя, описанного в статье [10]. Результаты, полученные нами, близки к данным, опубликованным в статье [10].

Исследовался сотовый заполнитель с характеристиками материала (1). Геометрические параметры сот принимались следующими:

$$l_1 = 6,1054 \text{ мм}; l_2 = 3,0527 \text{ мм}; \theta = 60^\circ; \\ l_c = 10 \text{ мм}; h_c = 0,4 \text{ мм}.$$

Рассматриваются соты, напечатанные FDM технологией таким образом, что ячейка сот имеет толщину в одну нить. Эта нить укладывается вдоль стенок ячеек сот.

При численном моделировании напряженно-деформированного состояния участка соты проводился анализ сходимости результатов расчета с помощью сгущения конечно-элементной сетки. Анализ сходимости показал, что 1745481 объемных конечных элементов достаточно для дискретизации кубической области (рис. 3).

В результате численных расчетов, получены следующие усредненные инженерные константы гомогенной среды:

$$E_{11} = 0,978 \text{ МПа}; E_{22} = 1,109 \text{ МПа}; \\ E_{33} = 149,101 \text{ МПа}; \nu_{12} = 0,926; \nu_{23} = 0,003; \\ \nu_{13} = 0,003; G_{12} = 0,868 \text{ МПа}; G_{23} = 25,559 \text{ МПа}; \\ G_{13} = 35,777 \text{ МПа}; \rho_c = 253,189 \text{ кг/м}^3.$$

Заключение

Предложен подход для расчета механических характеристик сотового заполнителя, напечатанного с помощью аддитивных технологий FDM. В основе подхода лежит моделирование части одной соты в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. В результате моделирования получена гомогенная среда, которая описывается законом Гука для ортотропного материала.

Это исследование поддержано Национальным фондом исследований Украины (грант номер 167/02.2020).

Литература

1. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения [Текст] : монография в 2-х т. Т. 1. Технологические несовершенства сотовых заполнителей и конструкций / А. В. Гайдачук, О. А. Карникова, А. В. Кондратьев, М. В. Сливинский. – Х. : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2012. – 279 с.

2. In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies [Text] / M. Xu, D. Liu, P. Wang, Z. Zhang, H. Jia, H. Lei, D. Fang // *Aerospace Science and Technology*. – 2020. – Vol. 106. – Article Id: 106081. – P. 1-10. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106081.

3. 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations [Text] / Y. Chen, T. Li, Z. Jia, F. Scarpa, C.-W. Yao, L. Wang // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 137. – P. 226-234. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.028.

4. 3D printing of high surface area ceramic honeycombs substrates and comparative evaluation for treatment of sewage in Phytoid application [Text] / P. Biswas, S. Mamatha, K. Varghese, R. Johnson, R. Vijay, R. Kumar // *Journal of Water Process Engineering*. – 2020. – Vol. 37. – Article Id: 101503. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101503.

5. Bitzer, T. N. *Honeycomb Technology* [Text] / T. N. Bitzer. – London : Chapman & Hall, 1997. – 233 p. DOI: 10.1007/978-94-011-5856-5.

6. Hohe, J. Effective stress-strain relations for two-dimensional cellular sandwich cores: Homogenization, material models, and properties [Text] / J. Hohe, W. Becker // *Applied Mechanics Reviews*. – 2002. – Vol. 55, No. 1. – P. 61–87. DOI : 10.1115/1.1425394.

7. The mechanics of two-dimensional cellular materials [Text] / L. J. Gibson, M. F. Ashby, G. S. Schajer, C. I. Robertson // *Proceedings of the Royal Society*. – 1982. – Vol. A 382. – P. 25–42. DOI: 10.1098/rspa.1982.0087.

8. Chen, Y. In-plane elasticity of regular hexagonal honeycombs with three different joints: A comparative study [Text] / Y. Chen, H. Hu // *Mechanics of Materials*. – 2020. – Vol. 148. – Article Id: 103496. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103496.

9. Chen, D.-H. Analysis of in-plane elastic modulus for a hexagonal honeycomb core: Analysis of Young's modulus and shear modulus [Text] / D.-H. Chen, H. Horii, S. Ozaki // *Journal of Computational Science and Technology*. – 2009. – Vol. 3, No. 1. – P. 1-12. DOI: 10.1299/jcst.3.1.

10. Catapano, A. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: homogenisation of core properties [Text] / A. Catapano, M. Montemurro // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 118. – P. 664-676. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.07.057.

11. Grediac, M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores [Text] / M. Grediac // *International Journal of Solids and Structures*. – 1993. – Vol. 30, No. 13. – P. 1777-1788. DOI: 10.1016/0020-7683(93)90233-W.

12. Becker, W. The in-plane stiffnesses of a honeycomb core including the thickness effect [Text] / W. Becker // *Archive of Applied Mechanics*. – 1998. – Vol. 68. – P. 334-341. DOI: 10.1007/s004190050169.

13. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts [Text] / M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-For-

cada, A.-A. Garcia-Granada, J. Lluma, S. Borros, G. Reyes // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 83. – P. 670-677. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.

14. Jones, R. M. *Mechanics of composite materials [Text] / R. M. Jones*. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – 538 p. DOI: 10.1201/9781498711067.

References

1. Gaidachuk, A. V., Karpikova, O. A., Kondrat'ev, A. V., Slivinskii, M. V. *Sotovye zapolniteli i panel'nye konstruksii kosmicheskogo naznacheniya [Space honeycomb and panel structures] in 2 vols. vol. 1. Tekhnologicheskie nesovershenstva sotovykh zapolnitelei i konstruksii [Technological imperfections of honeycomb fillers and structures]*. Kharkov, National Aerospace University "KhAI" Publ., 2012. 279 p.

2. Xu, M., Liu, D., Wang, P., Zhang, Z., Jia, H., Lei, H., Fang D. In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies. *Aerospace Science and Technology*, 2020, vol. 106. Article Id: 106081, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106081.

3. Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C.-W., Wang, L. 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Materials and Design*, 2018, vol. 137, pp. 226-234. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.028.

4. Biswas, P., Mamatha, S., Varghese, K., Johnson, R., Vijay, R., Kumar, R. 3D printing of high surface area ceramic honeycombs substrates and comparative evaluation for treatment of sewage in Phytoid application. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 37. Article Id: 101503. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101503.

5. Bitzer, T. N. *Honeycomb Technology*. London, Chapman & Hall Publ., 1997. 233 p. DOI: 10.1007/978-94-011-5856-5.

6. Hohe, J., Becker, W. Effective stress-strain relations for two-dimensional cellular sandwich cores: Ho-

mogenization, material models, and properties. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, vol. 55, no. 1, pp. 61-87. DOI: 10.1115/1.1425394.

7. Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S., Robertson, C. I. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society*, 1982, vol. A 382, pp. 25-42. DOI: 10.1098/rspa.1982.0087.

8. Chen, Y., Hu, H. In-plane elasticity of regular hexagonal honeycombs with three different joints: A comparative study. *Mechanics of Materials*, 2020, vol. 148. Article Id: 103496. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103496.

9. Chen, D.-H., Horii, H., Ozaki, S. Analysis of in-plane elastic modulus for a hexagonal honeycomb core: Analysis of Young's modulus and shear modulus. *Journal of Computational Science and Technology*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1299/jest.3.1.

10. Catapano, A., Montemurro, M. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: homogenisation of core properties. *Composite Structures*, 2014, vol. 118, pp. 664-676. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.07.057.

11. Grediac, M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores. *International Journal of Solids and Structures*, 1993, vol. 30, no. 13, pp. 1777-1788. DOI: 10.1016/0020-7683(93)90233-W.

12. Becker, W. The in-plane stiffnesses of a honeycomb core including the thickness effect. *Archive of Applied Mechanics*, 1998, vol. 68, pp. 334-341. DOI: 10.1007/s004190050169.

13. Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A.-A., Lluma, J., Borros, S., Reyes, G. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 2015, vol. 83, pp. 670-677. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.

14. Jones, R. M. *Mechanics of composite materials*. Boca Raton, CRC Press Publ., 1999. 538 p. DOI: 10.1201/9781498711067.

Поступила в редакцію 17.12.2020, рассмотрена на редколлегии 16.02.2021.

ДО РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТІЛЬНИКОВИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ АДІТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ FDM

Б. Успенський, К. Аврамов, І. Дерев'яно, І. Біблік

Стільниковий заповнювач моделюється гомогенним ортотропним середовищем. Механічні характеристики цього середовища визначаються моделюванням напружено-деформованого стану стільникового заповнювача в комерційному програмному комплексі ANSYS. Аналізується класичний шестикутковий стільниковий заповнювач. Інші види стільникових заповнювачів в цій роботі не розглядаються. Отримане в результаті гомогенізації середовище має ортотропні механічні характеристики. Стільниковий заповнювач надрукований з полікарбонату, який є ортотропним матеріалом. Запропонований в цій роботі підхід може застосовуватися для інших матеріалів, придатних для 3D друку. Механічні характеристики цього матеріалу сот експериментально визначені для надрукованих за допомогою FDM технологій зразків. В результаті шести скінченно-елементних розрахунків частини комірки стільникового заповнювача визначається матриця закону Гука. Для визначення різних компонент цієї матриці частина комірок стільникового заповнювача по-різному навантажується і по-різному закріплюється. Для розрахунку пружних характеристик стільників розглянуто четверту частину однієї комірки стільника. Четверта частина одного стільника моделюється в ANSYS. Для розрахунку механічних характеристик області навколо ділянки стільника доповнюється до куба «пружним

повітрям». Він є ізотропним матеріалом з малим модулем пружності. При проведенні обчислювальних експериментів сторони куба піддавалися постійному зміщенню u . Різних варіантів таких зміщень шість. В результаті чисельного моделювання визначаються елементи тензора напружень, усереднених за об'ємом скінченного елемента. В результаті розрахунків отримуємо набір дев'яти технічних констант гомогенного ортотропного середовища. При чисельному моделюванні напружено-деформованого стану ділянки стільника проводився аналіз збіжності результатів розрахунку за допомогою згущення скінченно-елементної сітки. Аналіз збіжності показав, що 1745481 об'ємних скінченних елементів досить для дискретизації кубічної області.

Ключові слова: стільниковий заповнювач, гомогенне середовище, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

ON CALCULATIONS OF MECHANICAL PROPERTIES OF HONEYCOMB PRODUCED BY FDM MANUFACTURING

B. Uspensky, K. Avramov, I. Derevianko, I. Biblik

Honeycomb is described by orthotropic homogeneous media. The mechanical properties of the media are described by the simulation of the stress state honeycomb in commercial software ANSYS. The classical hexagonal honeycomb is analyzed numerically. The other types of the honeycomb are not considered in this paper. The media, which is obtained as a result of homogenization, has orthotropic mechanical properties. The honeycomb is produced from polycarbonate, which is orthotropic material. The suggested approach can be applied to other materials, which are used for 3D printing. The mechanical properties of this honeycomb material are determined experimentally for specimens, which are produced by FDM manufacturing. The matrix of the Hooke law is obtained in the result of six finite element calculations of the cell part of the honeycomb. To determine the different elements of this matrix, the cell part of the honeycomb undergoes different boundary conditions and different stressing. The fourth part of one cell is considered to calculate honeycomb mechanical properties. The software ANSYS is used to calculate the fourth part of the cell. The area near the cell part is filled up to cube using elastic air. The elastic air is isotropic material with a small Young modulus. The cube sides undergo constant displacements to perform numerical analysis. Such different displacements are equal to six. As a result of the numerical simulations, the elements of the stress tensor are determined by the stress averaging on the volume of the finite element. As a result of calculations, the set of nine engineering constants of orthotropic homogeneous media is obtained. Analysis of the convergence of the numerical simulation results is carried out for numerical simulations of the stress state by the concentration of the finite element mesh. As follows from the convergence analysis, 1745481 3D finite elements are enough for the discretization of the cube area.

Keywords: honeycomb, homogeneous media, stress state, finite element method.

Успенский Борис Валерьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела надежности и динамической прочности, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина.

Аврамов Константин Витальевич – д-р техн. наук, проф., зав. отделом надежности и динамической прочности, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина.

Деревянко Игорь Игоревич – канд. техн. наук, начальник группы, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Библик Ирина Валентиновна – главный инженер-исследователь отдела надежности и динамической прочности, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина.

Boris Uspensky – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Reliability and Dynamic Strength Department, A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NASU, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Uspensky.kubes@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6360-7430, SCOPUS Author ID: 55233936800, Researcher ID: D-2310-2018.

Konstantin Avramov – D. Sci. (Engineering), Prof., Head of the Reliability and Dynamic Strength Department, A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NASU, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kvavramov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8740-693X, SCOPUS Author ID: 6701660322, Researcher ID: AAE-1166-2020.

Igor Derevianko – Cand. Sci. (Engineering), group leader, Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: dereviankoi2406@gmail.com.

Irina Biblik – chief engineer-researcher of the Reliability and Dynamic Strength Department, A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NASU, Kharkiv, Ukraine, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua, ORCID: 0000-0002-8650-1134, SCOPUS Author ID: 6504273980, Researcher ID: ABC-1237-2020.