

УДК 539.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

<sup>1,2</sup> **И. И. Деревянко**, канд. техн. наук

[dereviankoi2406@gmail.com](mailto:dereviankoi2406@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1477-3173

<sup>2</sup> **Б. В. Успенский**, канд. техн. наук

[Uspensky.kubes@gmail.com](mailto:Uspensky.kubes@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-6360-7430

<sup>2,3</sup> **К. В. Аврамов**, д-р техн. наук,

[kvavramov@gmail.com](mailto:kvavramov@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-8740-693X

<sup>4</sup> **А. Ф. Саленко**, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-5685-6225

<sup>2</sup> **И. В. Библик**, [miles@ipmach.kharkov.ua](mailto:miles@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0002-8650-1134

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», 49008, Украина, г. Днепр, ул. Криворожская, 3

<sup>2</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

<sup>3</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 61166, Украина, г. Харьков, пр. Науки, 14

<sup>4</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», 03056, Украина, г. Киев, пр. Победы, 37

*Предложен подход к экспериментально-расчетному исследованию сдвиговых характеристик сотовых заполнителей, изготовленных с помощью моделирования путем послойного наплавления (FDM). В основе экспериментального подхода лежит новый вид образца для испытания сотовых заполнителей на сдвиг. Этот образец содержит два сотовых заполнителя и три стальные пластинки. Испытания на сдвиг проводятся в универсальной разрывной машине TiraTest 2300. Сотовые заполнители изготавливаются из материалов ULTEM 9085 и PLA с помощью технологии FDM, которая реализуется в 3D-системе Fortus 900. В результате испытаний получены сдвиговые характеристики сотовых заполнителей путем осреднения кривых деформирования пяти образцов. Как следует из анализа экспериментальных результатов, наблюдается хрупкое разрушение сотового заполнителя. Перед его разрушением величина деформации сдвига для образцов из PLA составляла 0,0134, а для образцов из ULTEM – 0,0257. Экспериментальный анализ сопровождался численным конечно-элементным моделированием экспериментов на сдвиг с учетом деформации оснастки. При конечно-элементном моделировании экспериментов для описания поведения образцов необходимо учитывать влияние на измерения сдвиговых характеристик оснастки и деформирование каждой ячейки сотовых заполнителей. Учитывалось деформирование трех пластин; упругие свойства клеявого соединения не учитывались. Компьютерная модель деформирования сот с оснасткой была построена в ANSYS Design Modeler. При конечно-элементном моделировании рассматривалось только упругое поведение сотовых заполнителей.*

**Ключевые слова:** сотовый заполнитель, аддитивные технологии, сдвиг, кривая усилия–деформации.

### Введение

Сотовые заполнители, которые используются в многослойных конструкциях, могут изготавливаться с помощью аддитивных технологий [1]. Используя теорию гомогенизации [2–3], мы заменяем сотовые заполнители в расчетах сплошным ортотропным слоем. Для расчета механических характеристик этого ортотропного слоя разработаны аналитические и численные методы. Аналитические методы расчета механических характеристик сотовых заполнителей обсуждаются в работах [4–5]. Численные методы расчета механических характеристик сотовых заполнителей рассматриваются в статьях [6–7]. Для определения механических характеристик сотовых заполнителей широко используются экспери-

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© И. И. Деревянко, Б. В. Успенский, К. В. Аврамов, А. Ф. Саленко, И. В. Библик, 2021

ментальные методы. В [8] представлены исследования линейных механических характеристик сотовых заполнителей из материала Nomex. Результаты экспериментальных исследований сравниваются с результатами конечно-элементного моделирования. Экспериментальное исследование механических характеристик сотовых заполнителей выполнено в [9]. В этой работе показано, что балочные модели хорошо описывают механические характеристики сотовых заполнителей. Статья [10] исследует гашение энергии и демпфирующее поведение сотовой конструкции.

В настоящей работе экспериментально исследуются сдвиговые характеристики сотовых заполнителей, напечатанных с помощью аддитивной технологии FDM из PLA и ULTEM 9085. В результате такого анализа получены кривые усилия–деформации сдвига. Производится конечно-элементное моделирование эксперимента по определению сдвиговых характеристик в пакете ANSYS. При моделировании учитываются деформации оснастки.

### Описание эксперимента

3D-система Fortus 900 использовалась для печати образцов в виде сотовых заполнителей (рис. 1). Эта система использует технологию FDM. Сначала строилась 3D-модель сотового заполнителя. Эта модель преобразовывалась в программном пакете Insight™ с учетом следующих заданных опций. Наплавление слоев осуществлялось снизу вверх; наконечник расжижителя – T16 1 (полное заполнение). Высота слоя выбиралась автоматически, исходя из рекомендаций разработчика, количество слоев равнялось 45 при высоте сот 10 мм. Все стенки сотового заполнителя имели толщину два слоя, каждый из слоев образовывался одним проходом экструдера. Образцы изготавливались из материалов ULTEM 9085 и PLA. Для выбора остальных параметров технологического процесса использовалось программное обеспечение самого 3D-принтера. Эта программа делит деталь на слои и выбирает траектории движения инструмента. Воздушный зазор принимался нулевым.

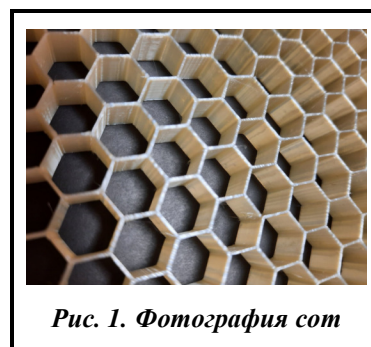


Рис. 1. Фотография сот

Печать сот производилась по следующему алгоритму.

1. Для печати задания необходимо сначала отправить файл задания в 3D-принтер из приложения, установленного на рабочей станции. Задания отправляются в 3D-принтер в формате СМВ и помещаются в очередь печати.

2. На рабочий стол 3D-принтера устанавливается новый модельный лист.

3. Устанавливаются контейнеры модельного и вспомогательного материалов и производится загрузка филамента в головку.

4. Включается питание 3D-принтера. Стабилизация 3D-принтера занимает приблизительно 4 часа.

5. Производится печать в автоматическом режиме.

6. После печати и остывания материала изделие извлекается из принтера и осуществляется удаление вспомогательного материала.

В результате проведенных работ была изготовлена серия пластин сотового заполнителя в количестве, необходимом для планируемого объема испытаний.

Для испытаний на сдвиг использовалась универсальная разрывная машина TiraTest 2300, позволяющая проводить испытания на растяжение/сжатие. Схема экспериментальной установки и эскиз образца приведены на рис. 2. Образец (рис. 2, а) состоит из двух блоков сотовых заполнителей 1. Эти блоки склеиваются с тремя стальными пластинами прямоугольной формы 2. Геометрические размеры конструкции приводятся на рис. 2, а в мм.

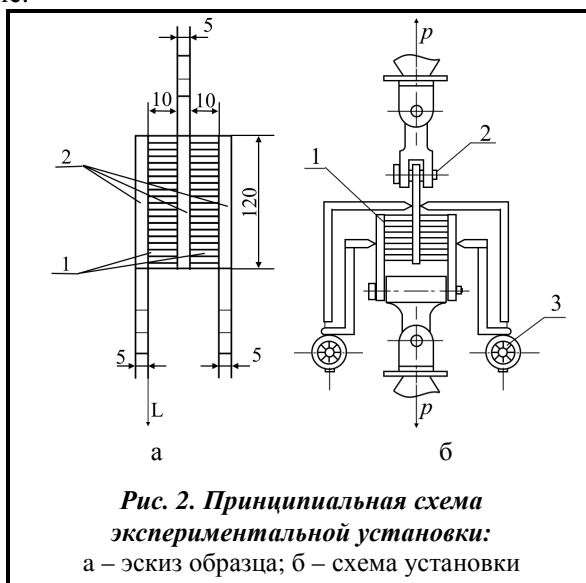


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки:  
а – эскиз образца; б – схема установки

Пластини изготовлені з листової сталі Ст. 20 товщиною 5 мм з отворами для установки образця в испытательную машину. Склеїка пластин і сот виконувалась епоксидним двохкомпонентним клеєм марки 3М™ Scotch-Weld™ DP190B/A.

Для проведення испытаній на сдвиг сотових панелей були підготовлені групи образців з ULTEM 9085 і PLA. Окончателі вид образців показан на рис. 3. Снизу представлений образец, сотові заповнювачі якого изготовлені з ULTEM 9085, а сверху – образец, сотові заповнювачі якого изготовлені з PLA. Розміри блока одного сотового заповнювача складають 120×60×10 мм.



Рис. 3. Образці для испытаній на сдвиг сотового заповнювача з матеріалів PLA (вверху) і ULTEM 9085 (внизу)

Підготовлений образец устанавлювався в захватах испытательной машины (рис. 2, б) так, чтобы направление действия нагрузки совпадало с продольной осью образця ( $L$  направление). Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2, б. Она состоит из образця 1, трех шарниров 2 и устройства для измерения перемещений 3 (микрометр).

Испытания проводились путем постепенного увеличения нагрузки до разрушения образця при равномерной скорости движения нагружающего захвата машины, равной 2 мм/мин. В ходе испытаній фиксировались и записывались нагрузки, перемещения и время. Нагрузка фиксировалась с использованием электронного датчика в диапазоне измерений до 10 т, а перемещения – с применением двух точечных индикаторов перемещений часового типа для каждого блока в отдельности. Они позволяют провести замер величин перемещений без учета деформаций металлических шарнирных соединений.

Испытания проводились путем постепенного увеличения нагрузки до разрушения образця при равномерной скорости движения нагружающего захвата машины, равной 2 мм/мин. В ходе испытаній фиксировались и записывались нагрузки, перемещения и время. Нагрузка фиксировалась с использованием электронного датчика в диапазоне измерений до 10 т, а перемещения – с применением двух точечных индикаторов перемещений часового типа для каждого блока в отдельности. Они позволяют провести замер величин перемещений без учета деформаций металлических шарнирных соединений.

#### Общий подход к численному моделированию

Проводилось конечно-элементное моделирование механических экспериментов по определению сдвиговых характеристик, при котором для описания поведения образцов необходимо учитывать влияние на сдвиговые характеристики оснастки и деформирование каждой ячейки. Учитывалось деформирование трех пластин (рис. 2, а); упругие свойства клеювого соединения не учитывались. Компьютерная модель деформирования сотовых наполнителей с оснасткой была построена в ANSYS Design Modeler. Один сотовый блок состоит из 12 рядов по 5 шестиугольников в каждом ряду. Размеры сотовых заповнювачей, напечатанных из материала PLA, составляли 117,6×60,8×10 мм, а из материала ULTEM 9085 – 104,7×60,8×10 мм. При построении конечно-элементной сетки сотового заповнювача с учетом деформирования каждой ячейки использовались 8-узловые гексагональные элементы (Hex8), т. е. применялось 3D-моделирование деформационного состояния. Геометрическая модель конструкции приведена на рис. 4. Вследствие малого размера конечных элементов и необходимости соединения конечно-элементных моделей образцов и оснастки стальные пластины разбивались на большое количество тетраэдрических элементов Tet10.

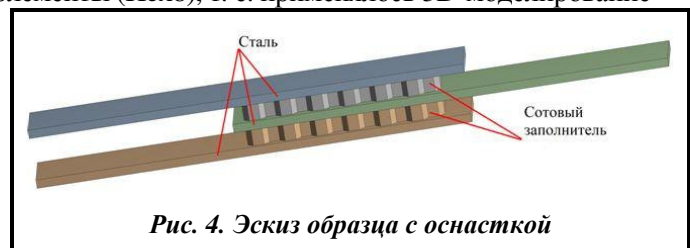


Рис. 4. Эскиз образця с оснасткой

При моделировании эксперимента использовались следующие граничные условия. Две крайние стальные пластины (рис. 4) зашпелены на левых краях, а на среднюю пластину справа действует сила  $F$ , направленная вдоль пластины ортогонально её краю. Значения  $F$  выбирались из эксперимента.

Механические характеристики материала сотового заповнювача определялись экспериментально. Они опубликованы в статье [11]. Эти характеристики приводятся в табл. 1, 2.

Таблица 1. Механические характеристики образця из ортотропного материала ULTEM 9085

$E_{11}$ , Па	$E_{22}$ , Па	$E_{33}$ , Па	$G_{12}$ , Па	$G_{13}$ , Па	$G_{23}$ , Па	$\nu_{32}$	$\nu_{13}$	$\nu_{12}$
$2,25 \times 10^9$	$2,96 \times 10^9$	$2,41 \times 10^9$	$6,67 \times 10^8$	$8,29 \times 10^8$	$8,89 \times 10^8$	0,32	0,33	0,31

Таблица 2. Механические характеристики образця из ортотропного материала PLA

$E_{11}$ , Па	$E_{22}$ , Па	$E_{33}$ , Па	$G_{12}$ , Па	$G_{13}$ , Па	$G_{23}$ , Па	$\nu_{23}$	$\nu_{31}$	$\nu_{21}$
$3,58 \times 10^9$	$3,00 \times 10^9$	$3,81 \times 10^9$	$1,07 \times 10^9$	$1,40 \times 10^9$	$1,41 \times 10^9$	0,224	0,22	0,25

### Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования

Рассмотрим результаты численного моделирования и экспериментального анализа сдвиговых характеристик сотовых заполнителей, изготовленных из материалов PLA и ULTEM 9085. Размеры одной ячейки сотового заполнителя из ULTEM 9085:  $h=0,5$  мм,  $l=6,05$  мм, где  $h$  – толщина стенки одной ячейки;  $l$  – длина внутренней стороны ячейки. Размеры одной ячейки сотового заполнителя из PLA:  $h=0,4$  мм,  $l=6,11$  мм. Значение сосредоточенной силы  $F$  изменялось в широком диапазоне от 750 до 9829,9 Н.

Результаты экспериментального и расчетного анализа сдвиговых характеристик для сотовых заполнителей из материалов PLA и ULTEM 9085 приведены на рис. 5, 6. По оси ординат на этих рисунках показывается величина силы  $F$ , а по оси абсцисс – деформация сдвига  $\gamma_{x1x3}$ . Сплошной линией на рис. 5, 6 показаны экспериментальные данные. Они получены в результате осреднения кривых деформирования пяти образцов. Треугольными маркерами показываются результаты конечно-элементного моделирования сдвига на основании расчетной модели, учитывающей деформирование каждой соты и деформирование оснастки. Как следует из экспериментального анализа, наблюдается хрупкое разрушение сотового заполнителя. При конечно-элементном моделировании рассматривалось только упругое поведение сотового заполнителя.

Перед разрушением образца сотового заполнителя из PLA величины силы  $F$  и деформации сдвига  $\gamma_{x1x3}$  принимали следующие значения:  $F=7101,86$  Н,  $\gamma_{x1x3}=0,0134$ . Перед разрушением образца сотового заполнителя из материала ULTEM наблюдались следующие значения силы  $F$  и деформации сдвига  $\gamma_{x1x3}$ :  $F=9829,0$ ,  $\gamma_{x1x3}=0,257$ .

Итак, результаты расчетов, приведенные на рис. 5, 6, свидетельствуют, что данные, полученные из прямого конечно-элементного расчета с учетом деформации каждой ячейки сотового заполнителя, близки к данным, полученным экспериментально.

По результатам расчета определялся модуль сдвига  $G_{x1x3}$  для сотового заполнителя из PLA и сотового заполнителя из ULTEM 085. Для сотового заполнителя из PLA модуль сдвига, полученный экспериментально, составляет 36,790 МПа;  $G_{x1x3}$ , полученный из конечно-элементного расчета модели (рис. 5), учитывающей деформацию каждой ячейки и деформацию оснастки, равняется 40,390 МПа; относительная разница полученных результатов – 0,097. Для сотового заполнителя из ULTEM 9085

модуль сдвига, полученный экспериментально, составляет 34,383 МПа;  $G_{x1x3}$ , полученный из конечно-элементного расчета модели (рис. 6), учитывающей деформацию каждой ячейки и деформацию оснастки, равняется 36,772 МПа; относительная разница полученных результатов – 0,069, т.е. расчетные и экспериментальные результаты близки.

Разрушение сотовых заполнителей при их испытаниях на сдвиг проходило по ячейкам. Клеевое соединение металла и ячеек оставалось целым. В этой работе рассмотрены статические процессы в конструкциях. Динамические процессы рассмотрены в других работах авторов этой статьи [12–13].

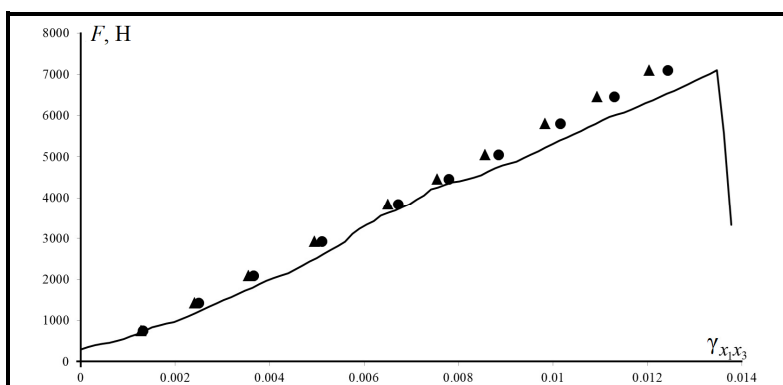


Рис. 5. Сравнение результатов конечно-элементного расчёта сдвига сотового заполнителя из материала PLA с экспериментальными данными

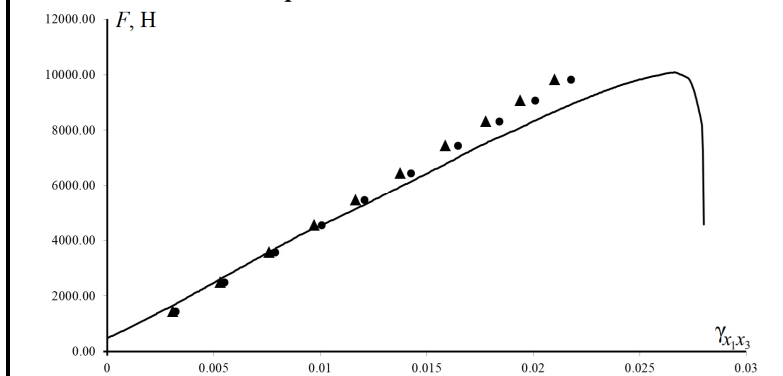


Рис. 6. Сравнение результатов конечно-элементного расчёта сдвига сотового заполнителя из материала ULTEM 9085 с экспериментальными данными



**Заклучение**

Предложен подход для экспериментального определения механических характеристик сотовых заполнителей, изготовленных с помощью аддитивных технологий. Для этого используется экспериментальная установка, которая одновременно определяет сдвиговые механические характеристики двух пластин сотовых заполнителей. В результате экспериментального анализа находится кривая усилия–деформации сдвига и модули сдвига.

Построена математическая модель, основанная на методе конечных элементов, описывающая сдвиговой эксперимент. В основе модели лежит прямое конечно-элементное моделирование всех ячеек сотовых заполнителей с учетом деформационной модели оснастки. В последней учитываются деформации пластин и не учитывается упругость клевого соединения.

**Финансирование**

Исследование финансировалось Национальным фондом исследований Украины (грант 128/02.2020).

**Литература**

1. 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. P. 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.028>.
2. Hohe J., Becker W. Effective stress-strain relations for two-dimensional cellular sandwich cores: Homogenization, material models, and properties. *Appl. Mech. Rev.* 2002. Vol. 55. Iss. 1. P. 61–87. <https://doi.org/10.1115/1.1425394>.
3. Vougiouka G., Rodrigues H., Guedes J. M. Prediction of elastic properties of sandwich panels using a homogenization computational model: Vautrin A. (eds.) *Mechanics of Sandwich Structures*. Springer, Dordrecht, 1998. P. 147–154. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9091-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9091-4_17).
4. Gibson L. J., Ashby M. F., Schajer G. S., Robertson C. I. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proc. R. Soc. London*. 1982. Vol. 382. P. 25–42. <https://doi.org/10.1098/rspa.1982.0087>.
5. Masters I. G., Evans K. E. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures*. 1996. Vol. 35. Iss. 4. P. 403–422. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2).
6. 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 Structure*. 2014. Vol. 118. P. 664–676. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.057>.
7. Grediac M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb core. *Intern. J. Solids and Structures*. 1993. Vol. 33. Iss. 13. P. 1777–1788. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(93\)90233-W](https://doi.org/10.1016/0020-7683(93)90233-W).
8. Foo C. C., Chai G. B., Seah L. K. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure. *Composite Structures*. 2007. Vol. 80. Iss. 4. P. 588–594. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.07.010>.
9. Balawi S., Abot J. L. The effect of honeycomb relative density on its effective in-plane elastic moduli: An experimental study. *Composite Structures*. 2008. Vol. 84. Iss. 4. P. 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.08.009>.
10. Bates S. R. G., Farrow I. R., Trask R. S. Compressive behaviour of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities. *Materials and Design*. 2019. Vol. 162. P. 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.019>.
11. Деревянко І., Аврамов К., Успенський Б., Саленко А. Експериментальний аналіз механічних характеристик деталей ракет-носіїв, виготовлених за допомогою FDM адитивних технологій. *Техн. механіка*. 2021. Вип. 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.15407/itm2021.01.092>.
12. Avramov K. V. Nonlinear vibrations characteristics of single-walled carbon nanotubes by nonlocal elastic shell model. *Int. J. Non-Linear Mech.* 2018. Vol. 107. P. 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.08.017>.
13. Avramov K. V., Gendelman O. V. Interaction of linear system with snap-through vibrations absorber. *Int. J. Nonlinear Mech.* 2009. Vol. 44. Iss. 1. P. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2008.09.004>.

Поступила в редакцію 22.10.2021

**Експериментальний та чисельний аналіз зсувних характеристик стільникових заповнювачів, отриманих адитивними технологіями**

<sup>1,2</sup> І. І. Деревянко, <sup>2</sup> Б. В. Успенський, <sup>2,3</sup> К. В. Аврамов, <sup>4</sup> О. Ф. Саленко, <sup>2</sup> І. В. Біблік

<sup>1</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»,  
49008, Україна, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3

<sup>2</sup> Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,  
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

<sup>3</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки,  
61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 14

<sup>4</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37

*Запропоновано підхід до експериментально-розрахункового дослідження зсувних характеристик стільникових заповнювачів, виготовлених за допомогою моделювання шляхом пошарового наплавлення (FDM) адитивною технологією FDM. В основі експериментального підходу лежить новий вид зразка для випробування стільникових заповнювачів на зсув. Цей зразок містить два стільникових заповнювача і три сталеві пластинки. Випробування на зсув проводяться в універсальній розривній машині TiraTest 2300. Стільникові заповнювачі виготовляються з матеріалів ULTEM 9085 і PLA за допомогою технології FDM, яка реалізується в 3D-системі Fortus 900. В результаті випробувань отримані характеристики зсуву стільникових заповнювачів через усереднення кривих деформування п'яти зразків. Як впливає з аналізу експериментальних результатів, спостерігається крихке руйнування стільникового заповнювача. Перед його руйнуванням величина деформації зсуву для зразків з матеріалу PLA становила 0,0134, а для зразків з матеріалу ULTEM – 0,0257. Експериментальний аналіз супроводжувався чисельним скінченно-елементним моделюванням експериментів на зсув з урахуванням деформації оснащення. При скінченно-елементному моделюванні експериментів для опису поведінки зразків необхідно враховувати вплив на вимірювання зсувних характеристик оснащення і деформування кожної комірки стільникових заповнювачів. Враховувалося деформування трьох пластин; пружні властивості клейового з'єднання не враховувалися. Комп'ютерна модель деформування стільників з оснащенням була побудована в ANSYS Design Modeler. При скінченно-елементному моделюванні розглядалася тільки пружна поведінка стільникових заповнювачів.*

**Ключові слова:** *стільниковий заповнювач, адитивні технології, зсув, крива зусилля–деформації.*