

УДК 539.3

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАТИЧНОГО ВИГИНУ ТРИШАРОВОЇ КОМПОЗИТНОЇ ПЛАСТИНИ ІЗ СТІЛЬНИКОВИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

¹ **І. І. Дерев'янюк**, канд. техн. наук
dereviankoi2406@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1477-3173

² **К. В. Аврамов**, д-р техн. наук
kvavramov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8740-693X

² **Б. В. Успенський**, канд. техн. наук
Uspensky.kubes@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-6360-7430

³ **О. Ф. Саленко**, д-р техн. наук,
ORCID: 0000-0002-5685-6225

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

² Інститут енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Комунальників, 2/10

³ Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
03056, Україна, м. Київ, пр. Берестейський, 37

Використання тонкостінних конструкцій із стільниковим заповнювачем, виготовленим за допомогою адитивних технологій, має декілька переваг у порівнянні із конструкціями, виготовленими завдяки використанню традиційних технологій. Передусім це пояснюється тим, що адитивні технології значно спрощують виготовлення стільникових заповнювачів. У статті запропоновано технологію виготовлення тришарової композитної пластини із стільниковим заповнювачем, отриманим за допомогою адитивних технологій. Як матеріал для виготовлення стільникового заповнювача було обрано пластик PLA. Друку здійснювався з використанням принтера «Дельта» з паралельними кінематичними ланцюгами із застосуванням FDM технологій. Температура друку становила 215 °С, температура стола – 60 °С. Запропоновано принципово нову схему експериментального стенду для вивчення вигину тришарової пластини. Метою досліджень є проведення випробувань зразків тришарової стільникової панелі на статичний вигин при жорсткому заціпленні одного краю зразка. Для випробувань використовувалася атестована розривна машина TiraTest 2300, що дозволяє проводити випробування на розтягнення і стиснення із заданою швидкістю руху траверси й вимірювати навантаження з відносною похибкою, що складає 1%. Розривна машина дає змогу провести навантаження зразка й провести замір навантаження і переміщення траверси. Для вимірювання деформацій поверхні обшивок використовується шістнадцятиканальна тензометрична станція. Як експериментальні дані отримані поперечні переміщення тришарової пластини. Вигин тришарової пластини моделюється в комерційному пакеті ANSYS. Результати експериментального і чисельного аналізу добре збігаються.

Ключові слова: тришарова композитна пластинка, адитивні технології, стільниковий заповнювач, скінченноелементна модель.

Вступ

Використання тонкостінних конструкцій із стільниковим заповнювачем, виготовленим за допомогою адитивних технологій, має декілька переваг у порівнянні з конструкціями, виготовленими з використанням традиційних технологій [1–5]. Вказане зумовлено тим, що адитивні технології значно спрощують виготовлення стільникових заповнювачів і сендвіч-оболонок [6, 7]. Стільникові заповнювачі мають велику міцність і жорсткість, а також малу вагу. Ці властивості дуже важливі для аерокосмічних застосувань. Більш того, адитивні технології можуть використовуватися для проєктування й виробництва супутників та інших літальних апаратів [8, 9].

Певні зусилля було докладено до експериментального й чисельного аналізу стільникових заповнювачів, виготовлених за допомогою адитивних технологій. Скінченноелементне моделювання й експерименти з аналізу втрати стійкості адитивно виготовленого стільникового заповнювача з дефектами розглянуто у [10]. Опір втрати стійкості восьмикутного стільникового заповнювача краще ніж у традиційного шестикутного стільникового заповнювача [11].

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© І. І. Дерев'янюк, К. В. Аврамов, Б. В. Успенський, О. Ф. Саленко, 2024

У цій статті запропоновано технологію виготовлення тришарової конструкції із стільниковим заповнювачем, виготовленим за допомогою адитивних технологій. Завдяки використанню вказаної технології виготовлено тришарові пластини із стільниковими заповнювачами. Запропоновано метод дослідження статичного деформування тришарових пластин із стільниковим заповнювачем, надрукованим за допомогою адитивних технологій. Результати експериментальних досліджень порівнюються з результатами чисельного моделювання у програмі ANSYS.

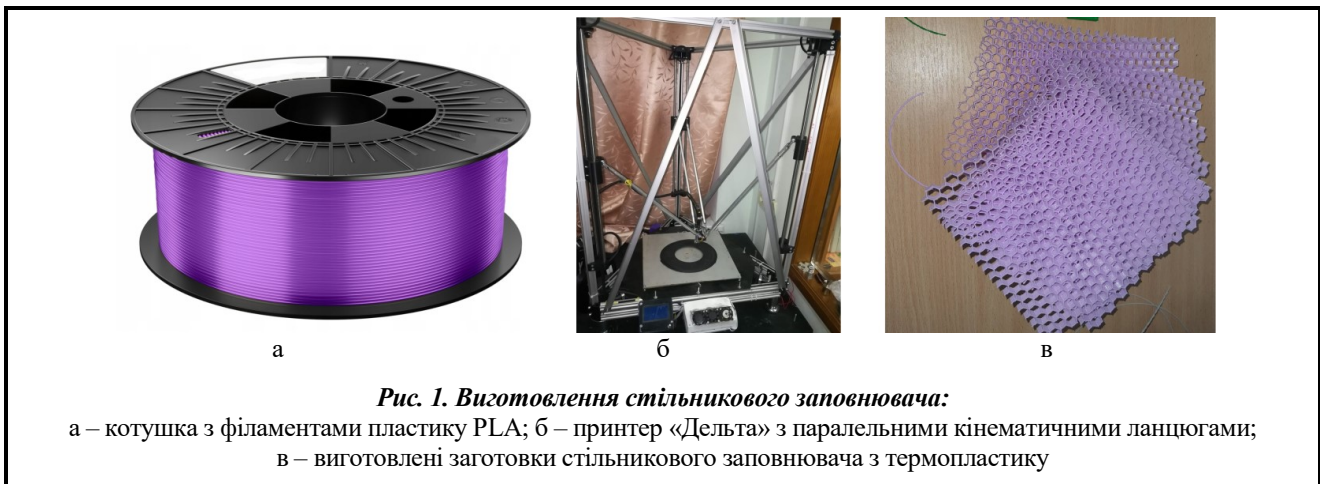
Технологія виготовлення тришарових зразків пластини для проведення статичних випробувань

Технологія виготовлення тришарового зразка пластини для проведення статичних випробувань складається з чотирьох блоків операцій, як-от:

- виготовлення стільникового заповнювача з термопластику за допомогою FDM адитивної технології;
- виготовлення обшивок із вуглепластику;
- склеювання стільникового заповнювача з тришаровою панеллю;
- механічна обробка тришарової панелі.

Зазначимо, що технологія виготовлення стільникового заповнювача розглядається в роботі [4].

Як матеріал для виготовлення стільникового заповнювача обрано пластик PLA (рис. 1, а). Друк здійснювався на принтері «Дельта» з паралельними кінематичними ланцюгами (рис. 1, б) з використанням FDM технологій. Температура друку становила 215 °С, температура стола – 60 °С відповідно до рекомендацій до друку цим матеріалом. Були виготовлені заготовки стільникового заповнювача (рис. 1, в) з розмірами 200 мм×180 мм×10мм.



Як матеріал обшивок обрано вуглепластик на основі препрега марки SIGRAPREG C U200-0/NF-E310/30% (рис. 2, а). Товщина шару становить 0,2 мм. Конструктивно верхня і нижня обшивки виготовлені симетрично, кожна складається з чотирьох шарів із схемою укладання 0, 90, 0, 90. Шари укладаються пошарово викладкою згідно зі схемою в ложемент, який поміщається у вакуумну плівку, що в зборі встановлюється в піч, і здійснюється полімеризація за режимом, вказаним виробником (рис. 2, б, в). При укладанні препрега в ложементи враховується важлива особливість: на внутрішню й зовнішню поверхні укладаються тканини, що дозволяють виконати зовнішню поверхню гладкою, а внутрішню – шорсткою. Шорсткість забезпечує підвищене зчеплення при склейці. У результаті виготовлено пластину для обшивок з розмірами 1000 мм×1000 мм×0,8 мм. Перед виготовленням тришарових панелей пластина розрізалася на заготовки (рис. 2, г) з розмірами 200 мм×200 мм.

Склеювання стільникового заповнювача з обшивками виконувалося епоксидним двокомпонентним клеєм марки 3M Scotch-Weld DP190B/A (сірий). Попередньо внутрішня поверхня обшивок оброблялася шкуркою і протиралася ізопропіловим спиртом. На обшивки через плунжер шприцом-аплікатором з розгладжуванням гумовим шпателем рівномірним шаром наносився клей згідно з виконаною розміткою. Отримані заготовки поміщали у вакуумний мішок на тканинну підкладку плас-

тинами з клейовим швом вниз, запобігаючи стіканню клею. Для недопущення зминання стільникового заповнювача на верхню частину заготовок поміщали вирізану за розмірами заповнювача технологічну пластину. Складання вакуумували, забезпечуючи рівномірне притискання заповнювача при тиску 0,95 атм протягом 22 годин до набору транспортувальної міцності. Аналогічно склеювалася і нижня обшивка. Перед механічною обробкою деталі витримувалися протягом 14 днів.

Механічна обробка здійснювалася із застосуванням відрізного верстата марки ТТ180-ВМ (рис. 3, а) з насосом для аспірації шкідливого вугільного пилу та шліфувального верстата JET JSG-64 (рис. 3, б) для припасування торців зразків. Попередньо на місце різання приклеювався малярський скотч для запобігання відшаруванню ниток і джгутів у торцях вуглепластикових обшивок. Після різання скотч видалявся. Із цією ж метою шліфування виконувалося виключно в поздовжньому напрямку. Готові тришарові зразки наведено на рис. 3, в.

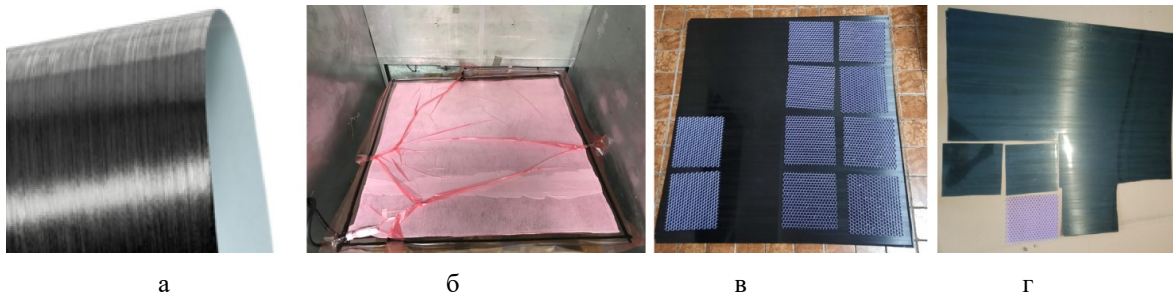


Рис. 2. Виготовлення обшивок із вуглепластику:

а – одиничний шар препрега; б – препрег у процесі полімеризації в печі;
в – виготовлена пластина вуглепластику; г – розрізка на заготовки

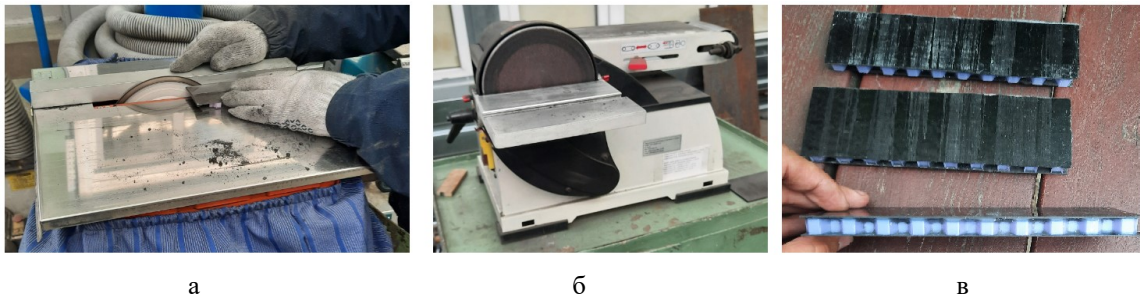


Рис. 3. Механічна обробка тришарової панелі:

а – відрізняльний верстат ТТ180-ВМ у процесі різання; б – шліфувальний верстат JET JSG-64;
в – готові тришарові зразки для випробувань на статичний та циклічний згин

Експериментальний аналіз статичного деформування тришарової пластини

Метою досліджень є проведення випробувань зразків тришарової стільникової панелі на статичний вигин при жорсткому зачепленні одного краю зразка. Для цього використовувалася атестована розривна машина TiraTest 2300 (рис. 4), що дозволяє проводити випробування на розтягнення і стиснення із заданою швидкістю руху траверси й вимірювати навантаження з відносною похибкою 1%. Розривна машина дає змогу провести навантаження зразка і здійснити замір навантаження й переміщення траверси. Для вимірювання деформацій поверхні обшивок використовується шістнадцятканальна тензометрична станція, що дозволяє вимірювати деформації з точністю 0,001%.

Для кріплення зразка застосовувалося доопрацьоване оснащення на триточковий згин (рис. 5, а). Безпосереднє кріплення зразка проводиться у тископодібних затискачах з урахуванням забезпечення горизонтального рівня. Ролик, що впливає, являє собою циліндр діаметром 30 мм. Місце контакту ролика віддалено від краю зразка на 15 мм. Додатково для підтвердження достовірності вимірювання переміщення використовувався точковий індикатор переміщень часового типу, а для реєстрації деформацій – тензодатчики типу BF200-10AA-A(11)-BX30. На кожен зразок встановлювалися 12 датчиків відповідно до схеми (рис. 5, б).

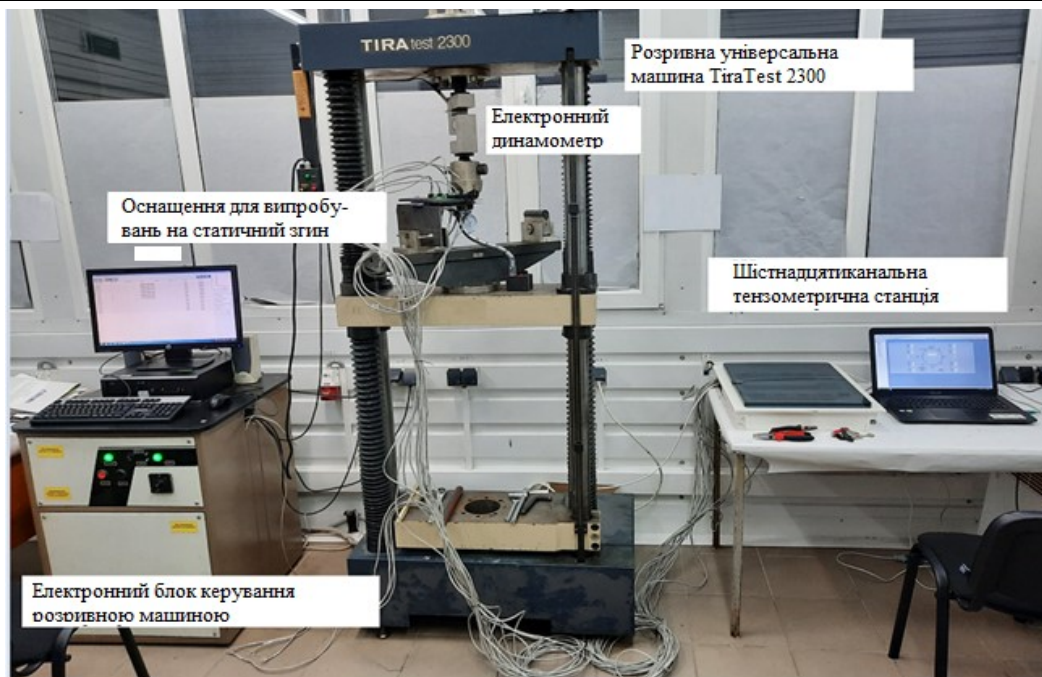


Рис. 4. Фото експериментального стенду для проведення статичних випробувань на згин

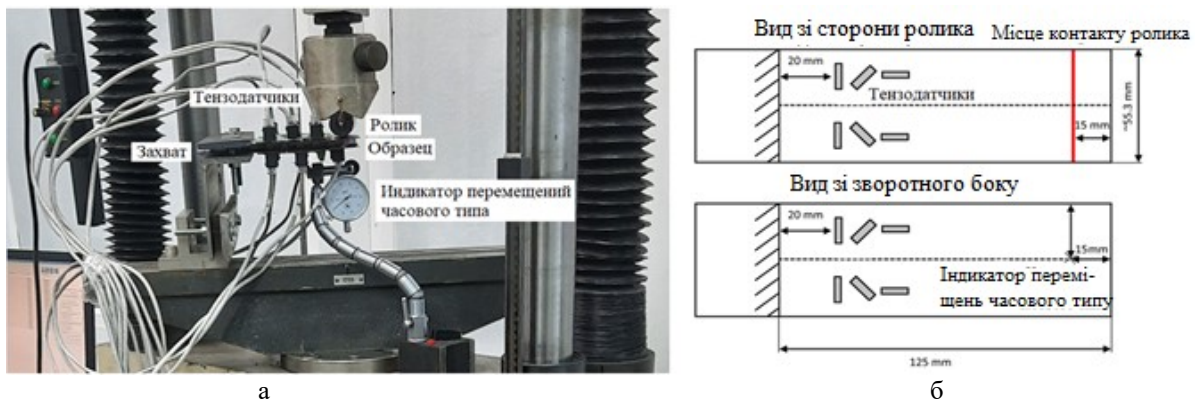


Рис. 5. Кріплення зразка у випробувальному оснащенні:
а – фото кріплення; б – схема зразка з відображенням розмірів

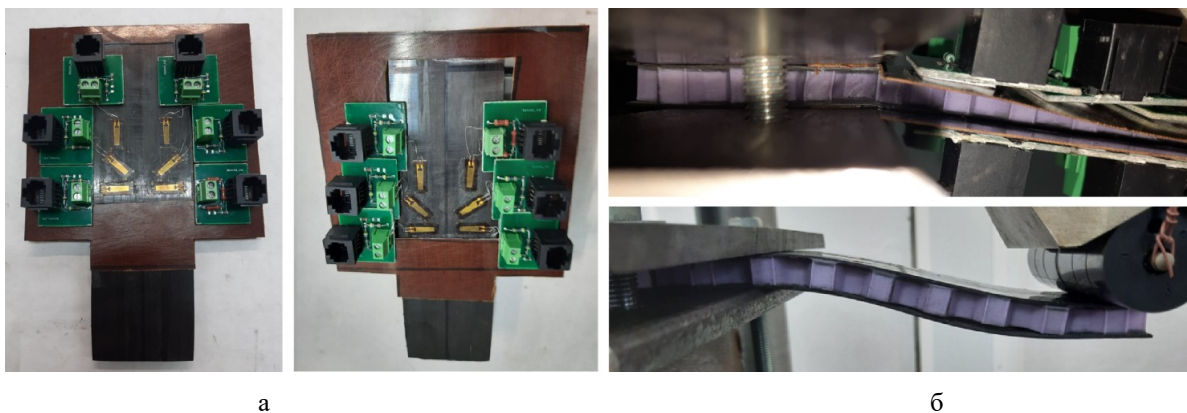


Рис. 6. Зразок тришарової стільникової панелі до та після навантаження:
а – фото обшивок із встановленими датчиками та мікросхемами; б – типове руйнування зразка

Перед поміщенням зразка в затискачі на нього наклеюються датчики за допомогою клею на основі ціаноакрилату. Для кожного датчика встановлюється мікросхема з резисторами, що являє собою мостову вимірювальну схему. Для їх розташування до зразка приклеюються картонні накладки, які не впливають на жорсткість зразка, але при цьому дозволяють встановити мікросхеми (рис. 6, а), що виключає провисання й обриви вусиків тензодатчиків.

При випробуваннях зразок навантажувався плавно із середньою швидкістю 2 мм/хв. У результаті випробувань спостерігалися два види можливого руйнування зразків: злам у зоні кріплення або фрагментарні відриви обшивок від стільникового заповнювача в районі максимального перегину (рис. 6, б).

На підставі отриманих даних побудовано залежності навантаження й деформацій до руйнування (рис. 7). Значення деформацій горизонтальних і нахилених датчиків фіксують незначні величини, сумірні з похибкою вимірювань. Основний інтерес становлять датчики, які приклеювалися в поздовжньому напрямку.

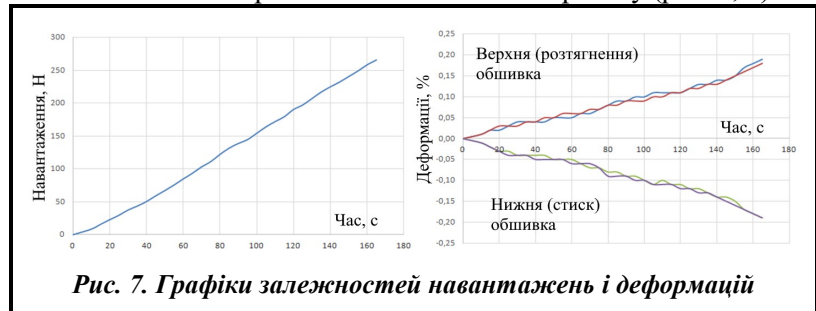


Рис. 7. Графіки залежностей навантажень і деформацій

Як видно (рис. 7), отримані криві деформації дуже близькі. При цьому розтягувальні деформації верхньої обшивки близькі до стискальних деформацій нижньої обшивки. Рівномірні деформації по ширині й між обшивками зразків стільникових панелей вказують на те, що панель є якісною, цільною і рівножорсткою конструкцією.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлено три зразки, які і вивчалися. Отримані результати близькі.

Математична модель дослідження статичного деформування пластини

Розглянемо математичну модель, яка використовується при дослідженні напружено-деформованого стану стільникового заповнювача у складі тришарової пластини. Для побудови математичної моделі стала у нагоді платформа скінченноелементного аналізу ANSYS Workbench (ANSYS WB). Математична модель складається з наступних компонентів: геометрична модель; фізична модель матеріалів, що використовуються; скінченноелементна модель; модель граничних умов; модель навантаження.

Розглядається сендвіч-пластина, що складається з вуглепластикових обшивок і стільникового заповнювача, виготовленого методом FDM. Процес виготовлення сендвіч-пластини описаний вище. При моделюванні товщина обшивок приймається 0,75 мм. Клейове з'єднання вважається ідеальним і непружним, тому для моделювання статичного деформування пластини обирається тришарова модель [4, 5]. Геометричні параметри сендвіч-пластини та комірки стільникового шару показані на рис. 8.

Для побудови геометричної моделі застосовувалося програмне забезпечення DesignModeler, яке входить до складу ANSYS WB. Геометричну модель стільникового заповнювача побудовано у двох варіантах: як повну і як гомогенізовану. Повна модель включає моделювання стільникового заповнювача з побудовою скінченноелементної моделі кожної комірки, гомогенізована являє собою стільниковий заповнювач з однорідним шаром з ефективними механічними властивостями.

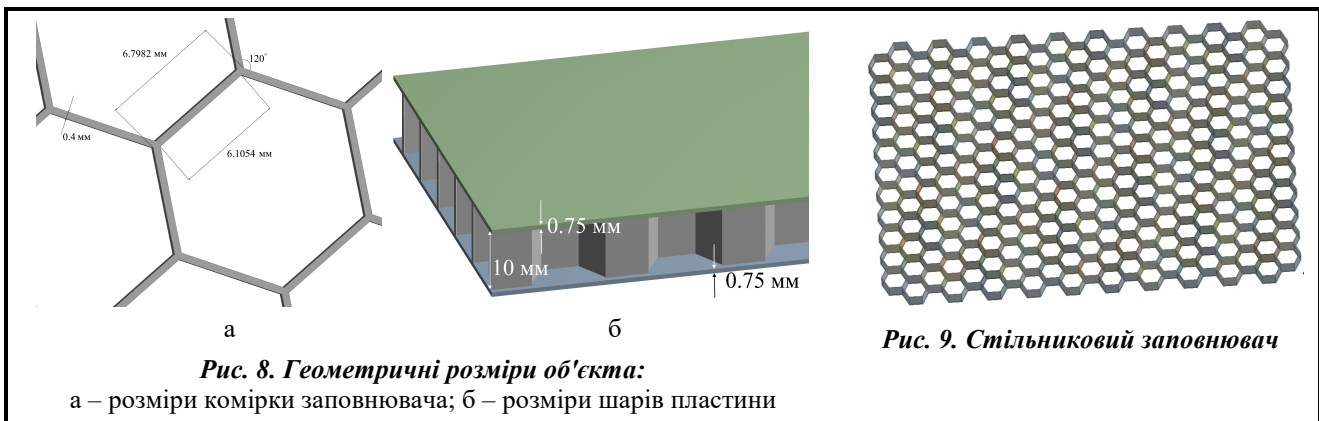


Рис. 8. Геометричні розміри об'єкта:

а – розміри комірки заповнювача; б – розміри шарів пластини

Рис. 9. Стільниковий заповнювач

Геометрична модель стільникового заповнювача будується шляхом моделювання однієї комірки з товщиною стінки 0,2 мм та її послідовного копіювання. У результаті отримуємо сукупність твердих тіл, зображену на рис. 9.

Для моделювання обшивок сендвіч-пластини будуються паралелепіпеди товщиною 0,75 мм, які позиціонуються за допомогою операцій Translate по краях заповнювача.

Для оцінки деформацій у місцях кріплення датчиків на обшивках ставляться точки за допомогою інструмента Point. Тип точки Remote Force дозволяє отримувати дані про значення деформацій. Моделі обшивок і заповнювача об'єднуються в єдиний об'єкт Part для зменшення кількості контактів у скінченноелементній моделі і формування коректної сітки.

У гомогенізованій моделі стільниковий заповнювач являє собою однорідний паралелепіпед (рис. 10). Місця кріплення датчиків і площинку навантаження задають аналогічно повній геометричній моделі.

Матеріали обшивок (4-шаровий композит SIGRAPREG C U200) і заповнювача (PLA) є ортотропними. Їх механічні характеристики, а також характеристики гомогенізованого заповнювача наведено в таблиці.

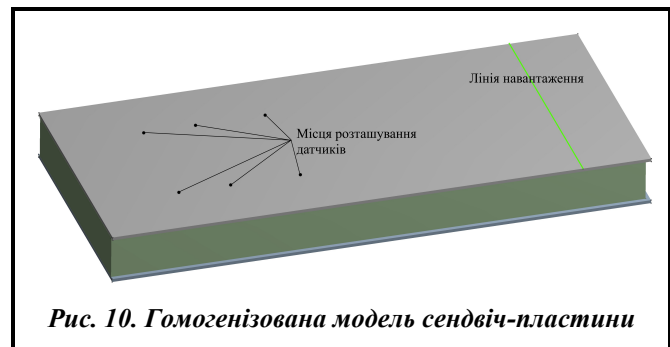


Рис. 10. Гомогенізована модель сендвіч-пластини

Для матеріалів обшивки і гомогенізованого заповнювача площина XY відповідає площині обшивки (заповнювача), вісь Z є поперечною. Для PLA вісь X відповідає напрямку укладання нитки, вісь Y – перпендикулярна їй у площині шару друку, вісь Z перпендикулярна шару друку.

Таблиця. Механічні властивості матеріалів сендвіч-пластини

Характеристика	Обшивка	PLA	Гомогенізований заповнювач
Модуль пружності при розтягненні ($X / Y / Z$), МПа	35000 / 35000 / 8000	3580 / 3000 / 3810	2,16 / 2,16 / 272,67
Модуль пружності при зсуві ($XZ / YZ / XY$), МПа	30000 / 30000 / 6000	1400 / 1410 / 1070	52,29 / 52,29 / 0,84
Коефіцієнт Пуассона ($XZ / YZ / XY$)	0,09 / 0,09 / 0,01	0,21 / 0,22 / 0,30	0,0018 / 0,0017 / 0,98
Густина, кг/м ³	1477	1240	88,741

При побудові скінченноелементної моделі використовується стандартна підпрограма Ansys Mechanical. В результаті побудована скінченноелементна сітка, що включає 6106989 вузлів і 1999604 елементи. Середнє значення метрики Element Quality становило 0,84126. Обшивки пластини розбиті на тетраедричні елементи. Скінченноелементна модель стільникового заповнювача складається переважно з 20-вузлових гексагональних елементів.

Для урахування анізотропії матеріалу визначається орієнтація зв'язаної системи координат скінченних елементів. Для цього використовується утиліта Element Orientation. Елементи скінченноелементної моделі обшивок спрямовані вздовж осей глобальної системи координат. Для завдання орієнтації зв'язаних систем координат елементів заповнювача вони направляються віссю Y перпендикулярно бічним поверхням стільників, а віссю Z – паралельно поперечному напрямку.

При проведенні статичних випробувань пластина зафіксована у затискачах. Для моделювання цих затискачів використовуються граничні умови Fixed Support.

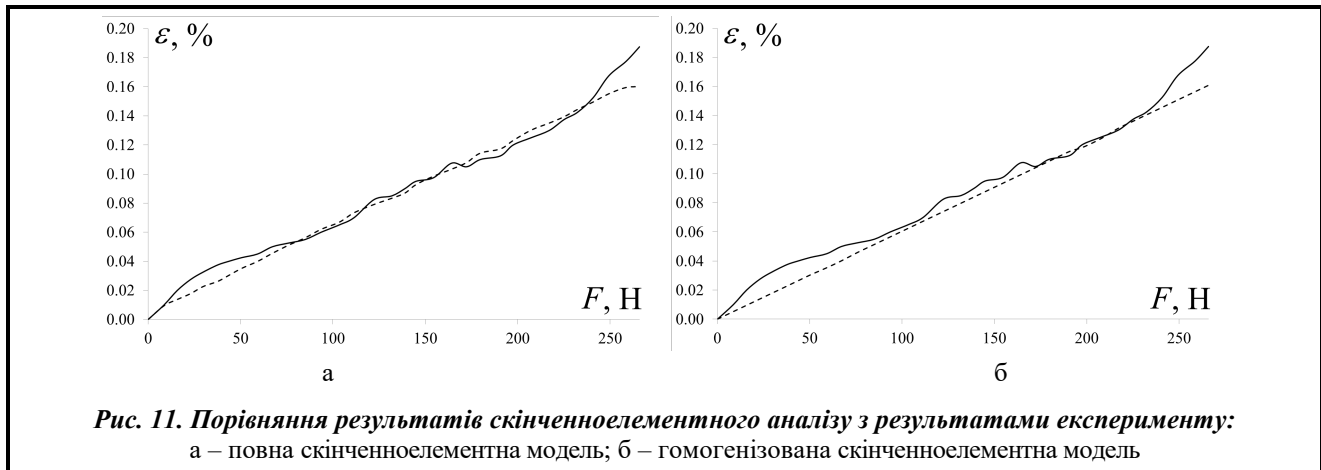
Навантаження пластини моделюється за допомогою інструмента Force, де сили прикладаються до лінії навантаження. Прикладена сила відповідає величині, яка вимірюється в ході експерименту. Вона спрямована у напрямку, зворотному осі Z глобальної системи координат.

Було проведено скінченноелементний аналіз статичного деформування тришарової сендвіч-пластини під впливом поперечного навантаження. Для чисельного аналізу використовувалася платформа ANSYS WB, система Static Structural пакету Ansys Mechanical. Значення сили варіювалося в межах від 0 до 265,89 Н. Такі самі значення сили використовувалися в експерименті.

Для розрахунків обрано дві моделі пластини. У повній моделі використовувалося пряме моделювання стільників, а в гомогенізованій стільниковий заповнювач замінювався однорідним ортот-

ропним шаром. Проводилося порівняння деформацій зовнішньої поверхні пластини у точках встановлення тензOMETричних датчиків. Для цього використовувалися інструменти Normal strain/Shear strain пакета Ansys Mechanical у точках встановлення датчиків. Оскільки значення деформацій у точках ліворуч, праворуч, зверху та знизу пластини однакові по модулю, як еталонні дані використовувалися усереднені показання датчиків по чотирьох точках.

Порівняння поздовжніх деформацій зразка, отриманих за результатами скінченноелементного аналізу (пунктир) й експерименту (суцільна лінія), наведено на рис. 11. По осі абсцис відкладається значення сили, прикладеної до ролика (в експериментальному аналізі) або до лінії навантаження (в скінченноелементному аналізі), а по осі ординат відкладаються значення поздовжніх деформацій верхньої обшивки на місці кріплення датчика.



Висновки

Результати скінченноелементного моделювання близькі до експериментальних даних як для повної, так і для гомогенізованої моделі деформування сендвіч-пластини. Істотні розбіжності в результатах починають спостерігатися при значеннях сили, що перевищують 249 Н. У цей момент відбулося руйнування клейового шару, що з'єднує стільниковий заповнювач і обшивку.

Таким чином, запропонована скінченноелементна модель використана для аналізу статичного деформування сендвіч-пластини під впливом поперечного навантаження. Обидві скінченноелементні моделі (повна й гомогенізована) дозволяють оцінити деформації пластини з достатньою точністю. Розроблені скінченноелементні моделі сендвіч-пластини успішно верифіковані й можуть використовуватися для аналізу міцності сендвіч-пластини із заповнювачем, виготовленим технологією FDM.

Фінансування

Вищенаведені результати отримані за проектом 2023.04/0001, що фінансується Національним фондом досліджень України.

Література

1. 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. Paper 106081. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106081>.
2. Chen Y., Li T., Jia Z., Scarpa F., Yao C., Wang L. 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Materials & Design*. 2018. Vol. 137. P. 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.028>.
3. Parsons E. M. Lightweight cellular metal composites with zero and tunable thermal expansion enabled by ultrasonic additive manufacturing: Modeling, manufacturing, and testing. *Composite Structures*. 2019. Vol. 223. Paper 110656. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.031>.
4. Derevianko I., Uspensky B., Avramov K., Salenko A., Maksymenko-Sheiko K. Experimental and numerical analysis of mechanical characteristics of fused deposition processed honeycomb fabricated from PLA or ULTEM 9085. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2023. Vol. 25. Iss. 2. P. 264–283. <https://doi.org/10.1177/10996362221137292>.

5. Uspensky B., Derevianko I., Avramov K., Polishchuk O., Salenko A. Experimental and numerical study on fatigue of sandwich plates with honeycomb core manufactured by fused deposition modeling. *Applied Composite Materials*. 2022. Vol. 29. P. 2033–2061. <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10057-w>.
6. Avramov K., Uspensky B. Nonlinear supersonic flutter of sandwich truncated conical shell with flexible honeycomb core manufactured by fused deposition modeling *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022. Vol. 143. Paper 104039. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104039>.
7. Avramov K., Uspensky B. Nonlinear forced vibrations of doubly curved sandwich shells with fused deposition processed flexible honeycomb core. *Acta Mechanica*. 2023. Vol. 234. P. 1183–1210. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03426-w>.
8. Matthews N. Additive metal technologies for aerospace sustainment. *Aircraft Sustainment and Repair*. 2018. P. 845–862. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100540-8.00015-7>.
9. Boparai K. S., Singh R. Advances in fused deposition modeling. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04166-7>.
10. Zhang S., Ma Y., Deng Z. Analytical solution and experimental verification for the buckling failure of additively manufactured octagonal honeycombs. *Composite Structures*. 2023. Vol. 303. Paper 116306. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116306>.
11. Mazaev A. V., Shitikova M. V., Soloviev I. A. The stressed state of three-layer composites with tetrachiral honeycombs under bending conditions: Mathematical modeling and additive manufacturing laboratory experiments. *Composite Structures*. 2023. Vol. 305. Paper 116550. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116550>.

Надійшла до редакції 21.08.2024