

А.В. Кондратьєв

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

АНАЛІЗ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І РЕАЛІЗОВАНИХ НИМИ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ

Проведено аналіз точності аналітичних моделей і реалізованих ними фізико-механічних характеристик різних типів композитних заповнювачів сендвічевих конструкцій. Дано оцінку точності наближених аналітичних залежностей фізико-механічних характеристик композитного стільникового заповнювача і встановлено їх застосовність на початкових стадіях проектування стільникових конструкцій. Відзначено далеко не ідеальну точність результатів числового експерименту, зумовлену наближеним характером стандартних методів випробувань. Як для модуля пружності, так і для модулів зсуву, їх значення, які отримані на основі технологій скінченно-елементного аналізу, перевищують відповідні їм величини, що визначались аналітичними формулами. Це перевищення над відповідними аналітичними значеннями для модулів зсуву близьке до постійної величини для різних кутів армування і не перевищує 1,14. Для модуля пружності першого роду перевищення змінюється від 1,03 до 1,8 для різних кутів армування стільників. Отримано аналітичні залежності зведених фізико-механічних характеристик трубчастого заповнювача. Ідея методики визначення фізико-механічних характеристик трубчастого заповнювача полягає в реалізації вимоги рівності відносних осьових і зсувних деформацій умовного суцільного типового елемента і реального, виділеного в межах однієї трубки, що враховує тільки її матеріал. Отримано висновок про те, що фізико-механічні характеристики трубчастого заповнювача, визначені за аналітичною моделлю, різною мірою відрізняються від відповідних характеристик, отриманих на основі технологій скінченно-елементного аналізу. При цьому відмінність у модулях пружності першого роду є істотно меншою, ніж у модулях зсуву. Проаналізовано причини цих розбіжностей. Обґрунтовано і рекомендовано використовувати постійні коригувальні коефіцієнти для аналітичних значень зведених фізико-механічних характеристик трубчастого заповнювача, що дозволять їх подальше використання при розрахунках пластинчастих і оболонкових сендвічевих конструкцій.

Ключові слова: сендвічеві конструкції, фізико-механічні характеристики, стільниковий та трубчастий заповнювачі.

Постановка проблеми

Сучасні конструкційні матеріали та конструктивно-технологічні рішення, які їх використовують, а також широкі можливості матеріалознавства, інформаційних комп'ютерних технологій та їх математичного забезпечення розкривають унікальні резерви підвищення масової ефективності силових конструкцій практично у всіх областях техніки і будівництва [1]. Такі резерви зокрема мають місце і при проектуванні будівельних сендвічевих конструкцій [2]. Такі конструкції здатні витримувати високі поперечні розподілені навантаження і володіють згинальною жорсткістю, що забезпечує малі прогини під навантаженням [3, 4]. Високі питомі міцність і жорсткість таких конструкцій дозволяють істотно знизити їх масу, а також трудомісткість і час монтажу в процесі будівництва споруд [5, 6].

Відомо, що повною мірою цим вимогам відповідають композитні сендвічеві конструкції з заповнювачами різних типів [7], серед яких найбільшого поширення знайшли стільникові [8], трубчасті [9], гофрові [10]. Унікальний комплекс міцнісних, технологічних і експлуатаційних характеристик цих заповнювачів виявив їх пріоритет серед інших і визначив широке застосування [11]. На теперішній час існує безліч, ще не вирішених проблемних задач щодо підвищення властивостей композитних заповнювачів і сендвічевих конструкцій на їх основі. Так використання як матеріалу для несучих обшивок і заповнювачів полімерних композитів створює можливість в широкому діапазоні регулювати їх зведеними фізико-механічними характеристиками (ФМХ) шляхом змінення кута укладання армувальних волокон з метою отримання оптимального поєднання властивостей сендвічевих конструкцій в цілому [12, 13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оптимальне проектування сендвічевих композитних конструкцій потребує використання зведених ФМХ заповнювачів. Сучасні засоби інженерного аналізу дозволяють знаходити напружено-деформований стан (НДС) таких конструкцій безпосередньо без заміни заповнювача, що використовується, деяким суцільним ортотропним матеріалом, тобто без його «розмазування» [14, 15].

Однак трудомісткість такого підходу, певно, виправдана тільки у випадках необхідності проведення перевірних розрахунків. На практиці ж конструктори завжди використовували і продовжують використовувати для сендвічевих конструкцій аналітичні моделі, що дозволяють теоретично розрахувати зведені ФМХ заповнювачів, виражені через їх геометричні параметри і властивості матеріалу, з якого вони виготовлені [16]. Використання цих моделей, дозволяючи отримати свідомо наближений результат, в головному допускають подальше директивне коригування кінцевого результату. Звідси виходить, що використання аналітичних моделей і реалізованих ними виразів для визначення ФМХ є надійним і ефективним засобом оптимізації параметрів сендвічевих композитних агрегатів різного призначення з урахуванням специфічних особливостей конструкцій.

Якщо такі характеристики, виражені через геометричні і фізико-механічні властивості ізотропних матеріалів для стільникових і ряду інших заповнювачів отримані давно і наведені в довідниках [11, 17], то аналогічні зведені характеристики композитних заповнювачів в довідковій літературі відсутні, а несуча здатність панельних і оболонкових конструкцій на їх основі встановлюється тільки експериментально [18, 19].

Відомо, що значення ФМХ стільникового заповнювача (СЗ) істотно залежать від рівня діючого навантаження, а також від особливостей сприйняття цього навантаження окремими елементами чарунки стільників [10, 11]. Існуючі на сьогоднішній день спроби домогтися задовільного зближення теоретичних і експериментальних даних за ФМХ СЗ зводяться до уточнення відомих математичних моделей стільників [10, 11] за рахунок впливу різних технологічних недосконалостей цього заповнювача [8].

Якщо аналітичні моделі СЗ і реалізовані ними ФМХ, виражені через геометричні і фізико-механічні властивості матеріалу для стільників, отримано досить давно, то аналогічні зведені характеристики трубчастого заповнювача (ТЗ) в довідковій літературі відсутні. Одним з перших

результатів у цьому напрямку були роботи, виконані за участю автора [20, 21].

У той же час суворі теорія жорстких ребристих заповнювачів з ізотропних матеріалів типу гофра пилкоподібної і трапецієподібної форми була розроблена А.Я. Александровим і основні результати, що стосуються визначення зведених пружних ФМХ ребристих наповнювачів, увійшли у відомий довідник [17]. Аналіз методики визначення ФМХ ребристих заповнювачів дозволив зробити деякі висновки щодо її застосування до розрахунку характеристик ТЗ [22, 23].

В першу чергу слід визнати продуктивним загальний підхід до синтезу ФМХ ТЗ, реалізований автором методики визначення характеристик ребристих заповнювачів, що полягає в обчисленні осьових і зсувних деформацій типового елемента реального заповнювача з подальшим їх прирівнюванням до відповідних деформацій умовного суцільного заповнювача, що займає той же об'єм, що і типовий елемент реального, а потім обчисленням на основі законів механіки деформівного твердого тіла зведених ФМХ умовного заповнювача при використанні при цьому ряду гіпотез і припущень, що стосуються характеру його деформування.

Така аналогія в підходах до визначення ФМХ ребристого заповнювача з ТЗ практично є вичерпаною.

Неможливість же прямого поширення методики синтезу ФМХ ребристого заповнювача на ТЗ містить такі аргументи [21, 22]:

- ребристий заповнювач складається з незамкнених умовних елементів, що практично виключають його роботу без приєднання до них несучих обшивок окрім деформації уздовж ребер (гофров), тоді як ТЗ складається із замкнутих елементів, здатних сприймати навантаження по усіх трьох осях і координатних площинах;

- методику визначення ФМХ ребристих заповнювачів розроблено тільки для ізотропних матеріалів, тоді як застосування ТЗ спочатку було орієнтовано на реалізацію потенційних можливостей ПКМ;

- методика розрахунку ФМХ ребристих заповнювачів є досить складною для практичного застосування в інженерних розрахунках агрегатів різноманітного призначення, побудованою на використанні численних графіків і багатократних перерахунків параметрів, що входять у них. Крім того, ці графіки не придатні для анізотропних матеріалів, різноманіття яких у разі реалізації ТЗ із ПКМ робить практично нереальною їх побудову для всіх можливих комбінацій характеристик матеріалу.

Мета та завдання дослідження

У зв'язку зі сказаним вище, актуальними є проведення аналізу точності аналітичних моделей і реалізованих ними ФМХ різних типів композитних заповнювачів сендвічевих конструкцій. Для досягнення цієї мети вирішувалася наступна задача:

– дати оцінку точності наближених аналітичних залежностей ФМХ композитних стільникового і трубчастого заповнювачів, встановити їх застосовність на різних стадіях проектування сендвічевих конструкцій.

Основна частина дослідження

Відомо [8, 11], що визначальними ФМХ СЗ є модулі пружності в поперечному до поверхні панелі напрямку та модулі зсуву G_{xz}^{C3} і G_{yz}^{C3} (рис. 1).

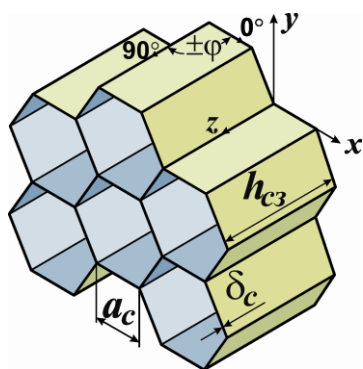


Рис. 1. Система координат і геометричні параметри стільникового заповнювача

Вирази для їх теоретичного визначення отримано понад півстоліття тому [17] і широко використовуються в практиці проектування стільникових конструкцій [11, 24]. Для СЗ з правильною шестигранною чарункою ці залежності мають вигляд:

$$\begin{aligned} E_z^{C3} &= 1,54 \frac{\delta_c}{a_c} E_M; \\ G_{xz}^{C3} &= 0,866 \frac{\delta_c}{a_c} G_M; \\ G_{yz}^{C3} &= 0,577 \frac{\delta_c}{a_c} G_M, \end{aligned} \quad (1)$$

де δ_c, a_c – товщина і розмір грані СЗ відповідно; E_M, G_M – модулі пружності і зсуву матеріалу СЗ.

Як вже зазначалося, застосування ПКМ як матеріалу для стільників створює можливості в широкому діапазоні змінювати їх ФМХ шляхом змінення кута укладання армувальних волокон у симетричній структурі, варіюючи цей кут в інтервалі $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ з метою отримання оптимального поєднання властивостей, які зумовлюють міцність і жорсткість СЗ.

Мабуть, ці залежності цілком справедливі і для стільників з ПКМ взагалі і композитного СЗ зокрема, якщо взяти $E_M = E_{z\varphi}^{KM}$, $G_M = G_{xz\varphi}^{KM}$ і $G_M = G_{yz\varphi}^{KM}$ в формулах (1) в прийнятій системі координат (рис. 1).

Залежності ФМХ симетрично армованих ПКМ є окремим випадком залежностей, що слідує із загальної механіки композитів [25, 26], і мають вигляд:

$$\begin{aligned} E_{x\varphi}^{KM} &= \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(B_{11} - \frac{B_{12}^2}{B_{22}} \right); E_{z\varphi}^{KM} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}} \right); \\ G_{xz\varphi}^{KM} &= \frac{B_{33}}{\delta_\Sigma}; G_{xz\varphi}^{KM} = \frac{B_{33}}{\delta_\Sigma}; \mu_{xz\varphi}^{KM} = \frac{B_{12}}{B_{22}}; \mu_{zx\varphi}^{KM} = \frac{B_{12}}{B_{11}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де коефіцієнти ефективної жорсткості пакета ПКМ визначаються таким чином

$$\begin{aligned} B_{11} &= \delta \left[\bar{E}_1 \cos^4 \varphi + 2\bar{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \right. \\ &\quad \left. + \bar{E}_2 \sin^4 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi \right]; \\ B_{12} &= \delta \left[(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi - G_{12} \sin^2 2\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \bar{E}_1 \mu_{21} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) \right]; \\ B_{22} &= \delta \left[\bar{E}_1 \sin^4 \varphi + 2\bar{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \right. \\ &\quad \left. + \bar{E}_2 \cos^4 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi \right]; \\ B_{33} &= \delta \left[(\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_1 \mu_{21}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \right. \\ &\quad \left. + G_{12} \cos^2 2\varphi \right]; \\ \bar{E}_1 &= \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}; \bar{E}_2 = \frac{E_2}{2 - \mu_{12} \mu_{21}}. \end{aligned}$$

Тут $E_1, E_2, G_{12}, \mu_{12}$ – пружні характеристики ПКМ (модулі пружності уздовж і поперек волокон, модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона відповідно); δ_Σ – сумарна товщина пакета ПКМ. Коефіцієнт Пуассона μ_{21} може бути визначений із експерименту одночасно з E_2 або з умови існування пружного потенціалу $E_1 \mu_{21} = E_2 \mu_{12}$.

Розглянемо можливість використання залежностей (2) стосовно до визначення зведених ФМХ СЗ за формулами (1) для скорочення витрат, часу на експериментальні або віртуальні дослідження.

На рис. 2 показано представницький елемент СЗ [8, 26], за допомогою якого визначаються ФМХ стільників за формулами (1).

З рис. 2, а видно, що при дії на представницький елемент трансверсальних зусиль P_z всі торці граней (AB, BC, CD, DE, EF, FK і KB) отримують однакову відносну деформацію ε_z , яка залежить від кута армування φ , що призводить до

суворої рівності E_z^{C3} СЗ цьому модулю $E_{x\varphi}^{KM}$ з формули (2) в площині її грані з постійним коефіцієнтом $1,54\delta_c/a_c$.

Аналіз елемента, показаного на рис. 2, б, дозволяє встановити, що зсувні деформації γ_{xz} для представницького елемента СЗ строго дорівнюють цим деформаціям в площині зведеної грані AB , граней CD і FK .

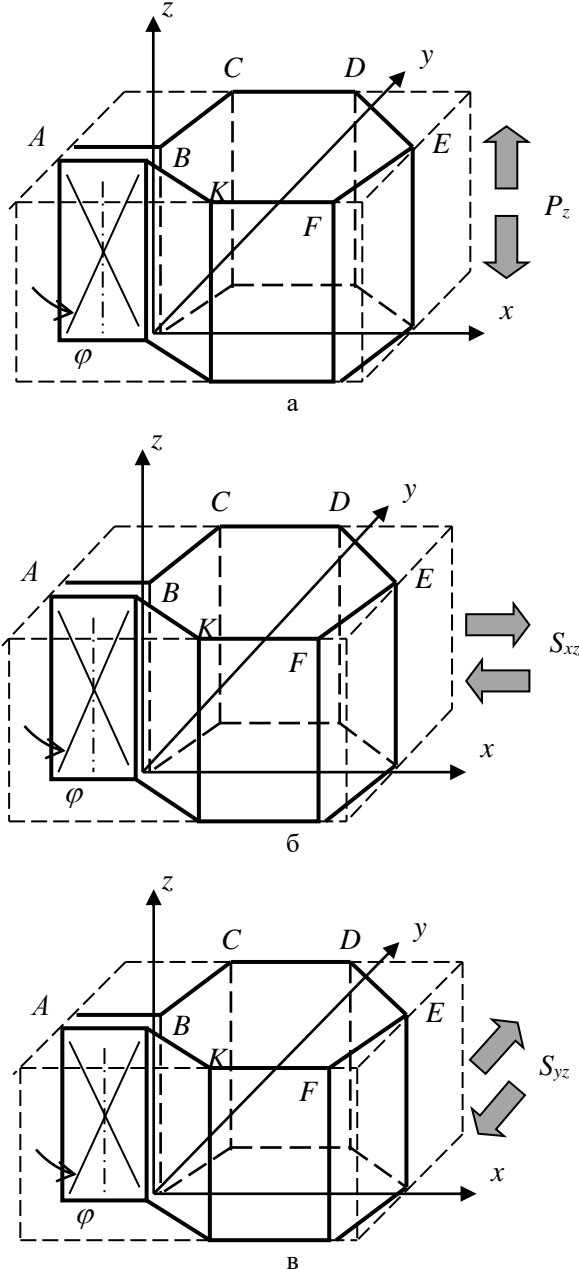


Рис. 2. Представницький елемент стільникового заповнювача для визначення його зведених модулів пружності: а – E_z^{C3} ; б – G_{xz}^{C3} ; в – G_{yz}^{C3}

У чотирьох же гранях (BC , DE , EK і KB) відносний зсув має дорівнювати куту γ_{xz} внаслідок виконання закону парності дотичних напружень в цих гранях і відповідно гранях AB , CD і FK .

На підставі цих міркувань має бути справедливою суворо рівність G_{xz}^{C3} в площині XOZ модулю зсуву $G_{xz\varphi}^{KM}$ в площинах граней з постійним коефіцієнтом $0,866\delta_c/a_c$.

Аналіз елемента стільників на рис. 2, в дозволяє вважати, що зсувні деформації γ_{yz} для представницького елемента СЗ строго дорівнюють тільки таким в фіктивних гранях CK і DF . В цьому випадку припущення про рівність модуля зсуву G_{yz}^{C3} СЗ в площині YOZ модулю зсуву $G_{yz\varphi}^{KM}$ у формулі (2) з коефіцієнтом $0,577\delta_c/a_c$ потребує експериментальної перевірки.

Таку перевірку було виконано на основі числового експерименту з використанням скінченно-елементних моделей, ідентичних описаним в роботі [8, 26, 27] для СЗ, виготовленого з ПКМ, ФМХ якого наведено в табл. 1, а обчислені для E_z^{C3} , G_{xz}^{C3} і G_{yz}^{C3} – на рис. 3. На графіках рис. 3 показано змінення модулів пружності вуглепластикового СЗ, розрахованих за формулами (1), на які нанесено точки, отримані за допомогою технології скінченно-елементного аналізу [8, 27].

Таблиця 1
Прогнозовані ФМХ вуглепластика для композитного СЗ

Марка вуглепластика	Товщина препрега (моношару) t , мм	Модуль пружності уздовж волокон E_1 , ГПа	Модуль пружності поперек волокон E_2 , ГПа	Модуль зсуву G_{12} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ_{12}
КМУ-4Э	0,1	115	28,3	5,5	0,25

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити таке. Як для модуля пружності, так і для модулів зсуву, їх значення, які отримані на основі інформаційних технологій скінченно-елементного аналізу E_z^{CE} , G_{xz}^{CE} , G_{yz}^{CE} , перевищують відповідні їм величини, що визначались аналітичними формулами (1) – (2) E_z^A , G_{xz}^A , G_{yz}^A . Це перевищення над відповідними аналітичними значеннями для модулів зсуву близьке до постійної величини для різних кутів армування і дорівнює $G_{xz}^{CE}/G_{xz}^A \approx 1,07$ та $G_{yz}^{CE}/G_{yz}^A \approx 1,14$ відповідно. Для модуля пружності E_z^{C3} перевищення змінюється від 1,25 при $\varphi=30^\circ$ до 1,8 при $\varphi=45^\circ$, а потім знову знижується до 1,32 при $\varphi=60^\circ$ та 1,03 при $\varphi=80^\circ$, що свідчить про

деяку відмінність закону змінення E_z^{C3} від встановленого аналітичною формулою (1).

Таким чином, проведений вище аналіз свідчить про те, що використання аналітичних залежностей модулів пружності і зсуву від кутів армування стосовно композитного СЗ є цілком обґрунтованим, в усякому разі, на ранніх стадіях проектування стільникових конструкцій. Однак необхідно відзначити і далеко не ідеальну точність результатів числового експерименту, що зумовлена наближеним характером стандартних методів випробувань,

детальний аналіз яких проведено в роботах [28, 29].

Так, в нашій роботі [30] наведено порівняння результатів натурних експериментів з отриманими на основі аналітичних моделей і скінченно-елементної підтримки для модулів зсуву G_{xz}^{C3} і G_{yz}^{C3} для алюмінієвих стільників (табл. 2–3). Це порівняння показує невелику розбіжність результатів, отриманих за аналітичними залежностями і скінченно-елементними моделями, особливо з урахуванням зазначених вище зауважень щодо точності тих та інших.

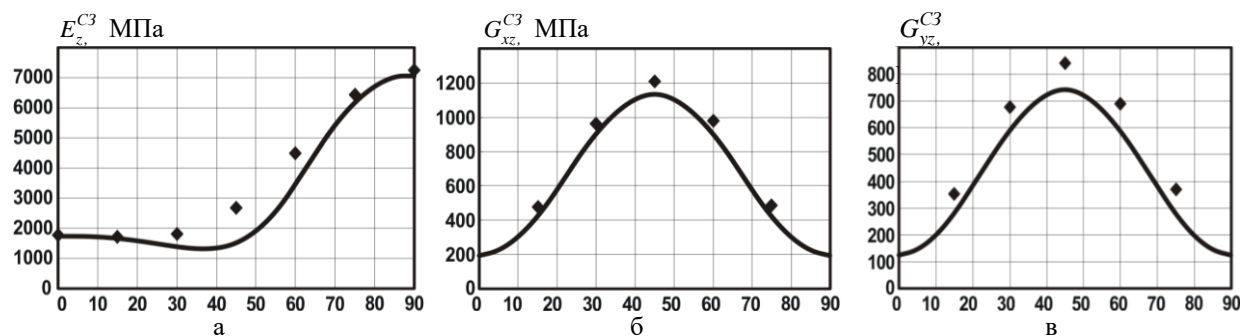


Рис. 3. Графік залежності модуля пружності вуглепластикового СЗ E_z^{C3} , зсуву G_{xz}^{C3} і G_{yz}^{C3} від кута його армування: — аналітичне визначення; ■ ■ ■ отримані на основі числового експерименту з використанням скінченно-елементних моделей

Таблиця 2

Порівняння значень модуля зсуву G_{xz}^{C3} , отриманих теоретично і експериментально

Розмір грані чарунки СЗ a_c , мм	Товщина фольги δ_c , мкм	Висота СЗ в зразках h_{c3} , мм	Теоретичне значення		Нижня межа $G_{xz}^{екс}$ (експеримент), МПа
			Аналітична модель (1) G_{xz}^A , МПа	Скінченно-елементна модель G_{xz}^{CE} , МПа	
2,5	30	13,5	280,58	303,578	240,5
		18		294,236	225,3
		38		259,324	197,1
5	30	18	140,29	145,677	107
		38		135,241	97,1
		40		187,06	192,607

Таблиця 3

Порівняння значень модуля зсуву G_{yz}^{C3} , отриманих теоретично і експериментально

Розмір грані чарунки СЗ a_c , мм	Товщина фольги δ_c , мкм	Висота СЗ в зразках h_{c3} , мм	Теоретичне значення		Нижня межа $G_{yz}^{екс}$ (експеримент), МПа
			Аналітична модель (1) G_{yz}^A , МПа	Скінченно-елементна модель G_{yz}^{CE} , МПа	
2,5	30	13,5	186,62	203,216	148,6
		18		196,491	125,2
		38		162,611	121,5
5	30	18	93,31	97,139	65,7
		38		89,251	60,3
		40		124,42	128,433

Як відзначалось вище, якщо аналітичні моделі СЗ і реалізовані ними ФМХ, виражені через геометричні і фізико-механічні властивості матеріалу для стільників, отримано досить давно, то аналогічні зведені характеристики трубчастого заповнювача (ТЗ) в довідковій літературі відсутні.

У зв'язку з цим нижче викладено подальший розвиток методики синтезу зведених ФМХ ТЗ, розробленої і реалізованої в роботах [20–22].

Параметри ТЗ, прийняті при синтезі його зведених ФМХ, показано на рис. 4.

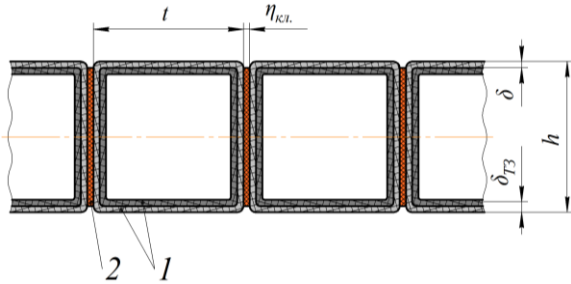


Рис. 4. Фрагмент ТЗ: 1 – моношар; 2 – клейовий шар; t – ширина трубки; h – висота трубки; $\delta_{ТЗ}$ – сумарна товщина трубчастого елемента; δ – товщина одного моношару трубчастого елемента; $\eta_{кл.}$ – товщина клею-зв'язуючого між трубчастими елементами

Ідея методики визначення зведених ФМХ ТЗ є принципово аналогічною реалізованій в [8, 11] для СЗ. Вона полягає в реалізації вимоги рівності відносних деформацій умовного суцільного типового елемента і реального, виділеного в межах однієї трубки, такого, що враховує тільки її матеріал. Якщо СЗ належить до класу легких заповнювачів, у яких ФМХ в площині сендвічевої панелі незрівнянно малі порівнянно з їх значеннями в напрямку, перпендикулярному до несучих обшивок, то ТЗ належить до класу жорстких, що мають ФМХ, близькі за величиною в напрямках усіх трьох осей. Тому для заповнювача цього типу необхідно визначити зведені ФМХ в напрямку всіх трьох осей координат і відповідних їм площинах.

Так, для визначення модуля пружності ТЗ в напрямку осі Z $E_z^{ТЗ}$ розглядався умовний суцільний елемент (рис. 5, а) і реальний трубчастий елемент (рис. 5, б), до яких прикладене певне зусилля P_z , що викликає в умовному і реальному елементах відповідні відносні подовження

$$\varepsilon_z^{el} = \frac{P_z}{h \cdot t \cdot E_z^{ТЗ}} \text{ і } \varepsilon_z^{mp} = \frac{P_z}{2(h+t) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{z\varphi}^{КМ}}, \quad (3)$$

прирівнявши які отримаємо

$$E_z^{ТЗ} = \frac{2(h+t) \cdot \delta_{mp}}{h \cdot t} E_{z\varphi}^{КМ}. \quad (4)$$

Тут $E_{z\varphi}^{КМ}$ – модуль пружності ПКМ трубчастого елемента в напрямку осі Z.

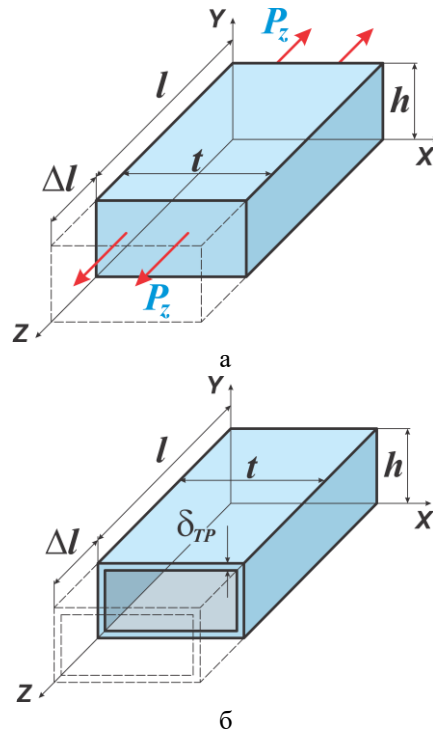


Рис. 5. Типовий елемент ТЗ для визначення модуля пружності $E_z^{ТЗ}$: а – суцільний елемент; б – реальний трубчастий елемент

Зведені модулі пружності ТЗ в напрямку осі X (поперек трубки) і Y (перпендикулярно до площини трубки) визначаються аналогічно при розгляді відповідних типових елементів і мають вигляд

$$E_x^{ТЗ} = \frac{2\delta_{mp}}{h} E_{x\varphi}^{КМ}; E_y^{ТЗ} = \frac{2\delta_{mp}}{t} E_{y\varphi}^{КМ}. \quad (5)$$

Зведені модулі зсуву $G_{xz}^{ТЗ}$, $G_{yz}^{ТЗ}$ і $G_{xy}^{ТЗ}$ визначалися з рівності відносних кутів зсуву суцільного і реального ТЗ при дії зусиль зсуву відповідно S_{xz} , S_{yz} і S_{xy} і мають вигляд

$$\begin{aligned} G_{xz}^{ТЗ} &= \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{xz\varphi}^{КМ}; \\ G_{yz}^{ТЗ} &= \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{yz\varphi}^{КМ}; \\ G_{xy}^{ТЗ} &= \frac{\delta_{mp}^3}{h^2 t} G_{xy\varphi}^{КМ}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $G_{xz\varphi}^{КМ}$, $G_{yz\varphi}^{КМ}$ і $G_{xy\varphi}^{КМ}$ – модулі зсуву ПКМ ТЗ у відповідних площинах.

Таким чином, аналітичні залежності для визначення модулів пружності та зсуву ТЗ знайдено.

Для оцінювання достовірності отриманих аналітичних результатів було проведено серію числових експериментів з використанням

скінченно-елементних моделей, ідентичних описаним в наших роботах [21, 22] для ТЗ, виготовленого з ПКМ, ФМХ якого наведено в табл. 4.

Таблиця 4
ФМХ склопластика з тканини Т-10-14 і зв'язуючого ЕДТ-69Н

Марка склопластика	Товщина (моношля) мм	Модуль пружності уздовж волокон E_1 , ГПа	Модуль пружності поперек волокон E_2 , ГПа	Модуль зсуву G_{12} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ_{12}
Т-10-14	0,24	32,4	26,3	3,24	0,07

При проведенні числового експерименту як навантаження на зразок було прикладене зусилля, а вимірюваною величиною було переміщення. Як приклад на рис. 6 показано скінченно-елементну модель системи трубок з граничними умовами для визначення модуля пружності E_x^{T3} з картиною розподілу лінійних переміщень, що відповідає їм.

У табл. 5 наведено результати порівняння аналітичного розрахунку і числового експерименту для модулів пружності та зсуву ТЗ.

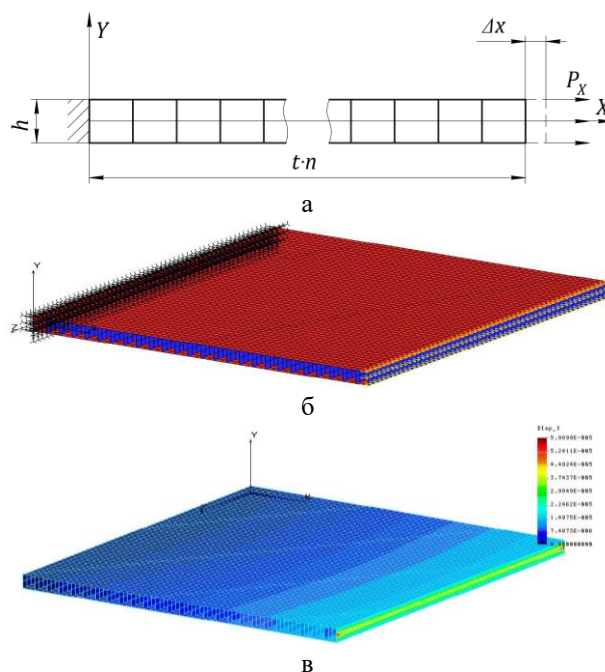


Рис. 6. Визначення зведеного модуля пружності ТЗ уздовж осі X: а – схема навантаження і закріплення системи трубок; б – згенерувала скінченно-елементна модель зразка; в – отримана картина лінійних переміщень уздовж осі X.

Таблиця 5
Результати порівняння аналітичного розрахунку і числового експерименту для модулів пружності та зсуву трубчастого заповнювача

Найменування ФМХ	Аналітичний результат		Результат числового експерименту	
	без урахування клейового шару	з урахуванням клейового шару	без урахування клейового шару	з урахуванням клейового шару
Модуль пружності вздовж осі X, МПа	672	687	580	585
Модуль пружності вздовж осі Y, МПа	672	653	784	822
Модуль пружності вздовж осі Z, МПа	1344	1174	917	957
Модуль зсуву в площині XY, МПа	0,134		0,212	0,218
Модуль зсуву в площині YZ, МПа	358	358	576	589
Модуль зсуву в площині ZX, МПа	370		128	130

На підставі аналізу точності отриманих аналітичних моделей ТЗ і реалізованих ними ФМХ можна зробити такі висновки [20–22]:

1. ФМХ, визначені за аналітичною моделлю ТЗ, різною мірою відрізняються від відповідних характеристик, отриманих на основі інформаційних технологій скінченно-елементного аналізу. При

цьому відмінність у модулях пружності першого роду є істотно меншою, ніж у модулях зсуву. Причини цих розбіжностей мають комплексний характер. Що стосується аналітичних залежностей модулів пружності E_x^{T3} , E_y^{T3} та E_z^{T3} від геометричних параметрів ТЗ і фізичних характеристик їх

матеріалу, то тут головною причиною їх неточності є, очевидно, досить грубі допущення, прийняті при урахуванні характеру деформації елементів ТЗ під впливом відповідних зусиль.

При цьому вплив цих допущень на рівень визначуваних характеристик може бути різним: вони можуть призводити до зниження одних характеристик і завищення інших щодо невідомих їх істинних значень. Це стосується і модулів зсуву, причому характер їх теоретичних значень може відрізнятися від такого для модулів пружності. Встановити кількісні значення цих відхилень від передбачуваних істинних величин з тією чи іншою мірою наближення можна тільки через ускладнення відповідних математичних моделей і (чи) прийняття точніших допущень про характер деформації тих чи інших елементів ТЗ.

Самі ж істинні величини ФМХ ТЗ здавалося б, могли бути встановлені на основі фізичного експерименту на зразках ТЗ. Проте ці величини також залежатимуть від форми і розмірів відповідних зразків, умов їх закріплення і схеми випробувань, стандарти на які для ТЗ не встановлено [21, 22].

Чекати встановлення істинних значень ФМХ ТЗ в усякому разі найближчим часом безперспективно, незважаючи на значні матеріальні і часові витрати на виготовлення і випробування зразків ТЗ.

У той же час прогрес комп'ютерних технологій зробив привабливим використання інформаційних технологій скінченно-елементного аналізу для встановлення ФМХ ТЗ шляхом віртуальних випробувань їх зразків в одному з програмних комплексів [21, 22]. Проте міра достовірності отриманих результатів також залежить від ряду чинників, до яких, передусім, слід віднести [14, 15]:

- геометричну форму і розміри зразків;
- вибір і точність реалізації схеми закріплення зразка при тому чи іншому виді навантаження;
- спосіб відтворення виду навантаження, що відповідає встановленню тієї або іншої ФМХ або показника міцності;
- розміри і вид скінченних елементів, на які розбивається відповідний зразок.

У зв'язку з цим устанавлення кількісних значень відхилень ФМХ ТЗ від передбачуваних істинних величин, як і у випадках, розглянутих вище, також є дуже ускладненим.

Певну міру достовірності має, на наш погляд, близькість результатів визначення тієї чи іншої ФМХ ТЗ, отриманих за аналітичною і скінченно-елементною моделями.

Тому представляється виправданим, у зв'язку з тим, що використання аналітичних залежностей ФМХ ТЗ не пов'язано з якими б то не було

витратами, а отримання ФМХ ТЗ за допомогою інформаційних технологій скінченно-елементного аналізу у кожному конкретному випадку потребує певних додаткових витрат, рекомендується використовувати в проектувальних розрахунках виробів з ТЗ відкориговані аналітичні залежності за допомогою постійних коефіцієнтів, що встановлюють відношення

$$K_i^* = \frac{\Phi M X_i^A}{\Phi M X_i^{CE}} \quad (7)$$

при подальшому визначенні $\Phi M X_i^A$ для нових ПКМ і геометричних параметрів ТЗ.

При цьому, враховуючи зазначену наближеність такого підходу, вибирати в запас міцності те значення K_i^* , яке менше одиниці, а у разі, коли воно перевищує одиницю, приймати $K_i^* = 1$.

Тоді на підставі проведених вище числових експериментів і порівняння їх результатів з отриманими за аналітичною моделлю (табл. 5) є виправданим ввести значення коригувальних коефіцієнтів для відповідних ФМХ ТЗ [21, 22], поданих у табл. 6.

Таблиця 6
Рекомендовані коригувальні коефіцієнти для аналітичних значень зведених ФМХ ТЗ

Найменування ФМХ	$\frac{\Phi M X_i^A}{\Phi M X_i^{CE}}$	Коригувальний коефіцієнт K_i^*
Модуль пружності вздовж осі X E_x^{T3} , МПа	1,16	1
Модуль пружності вздовж осі Y E_y^{T3} , МПа	0,85	0,85
Модуль пружності вздовж осі Z, E_z^{T3} , МПа	1,47	1
Модуль зсуву в площині XY G_{xy}^{T3} , МПа	0,625	0,625
Модуль зсуву в площині ZY G_{zy}^{T3} , МПа	0,625	0,625
Модуль зсуву в площині XZ G_{xz}^{T3} , МПа	2,75	1

Останнє, проте, не виключає подальших досліджень у напрямку підвищення точності як аналітичних, так і скінченно-елементних моделей, які, мабуть, мають привести або до зближення, або до збігу результатів.

Висновки

Проведено аналіз точності аналітичних моделей і реалізованих ними ФМХ різних типів композитних заповнювачів сендвічевих конструкцій. Дано оцінку точності наближених аналітичних залежностей ФМХ композитного СЗ і встановлено їх застосовність на початкових стадіях проектування стільникових конструкцій. Отримано аналітичні залежності зведених ФМХ ТЗ. Обґрунтовано і рекомендовано використовувати постійні коригуючі коефіцієнти для аналітичних значень зведених ФМХ ТЗ, що дозволяють їх подальше використання при розрахунках пластинчастих і оболонкових сендвічевих конструкцій.

Література

1. Birman V. Review of current trends in research and applications of sandwich structures / V. Birman, George A. Kardomateas // *Composites Part B: Engineering*. – 2018 – Vol. 142. P. 221–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>
2. Yanes-Armas S. Long-term design of FRP-PUR web-core sandwich structures in building construction / S. Yanes-Armas, J. De Castro, T. Keller // *Composite Structures*. – 2017. – No. 181. – P. 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.089>
3. Elfaki I. Composite sandwich structures in advanced civil engineering applications – a review / I. Elfaki, S. Abdalgadir // *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering* – 2020. – No. 6. – P. 259–262.
4. Ding K.W. Application of composite sandwich panels in construction engineering / K.W. Ding, G. Wang, W.Y. Yin // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 291–294. – P. 1172–1176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.291-294.1172>
5. Manalo A. State-of-the-art review on FRP sandwich systems for lightweight civil infrastructure / A. Manalo, T. Aravinthan, A. Fam, B. Benmokrane // *Journal of Composites for Construction*. – 2016. – Vol. 21, Iss. 1. P. 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000729](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000729)
6. Петрова Е.А. К оценке предельных состояний трехслойных сэндвич-панелей / Е.А. Петрова, О.А. Калмыков // *Комунальне господарство міст* – 2015. – Вип. 121. – С. 38–41.
7. Feng Y. Creative design for sandwich structures: a review / Y. Feng, H. Qiu, Yicong Gao, Hao Zheng, J. Tan // *International Journal of Advanced Robotic Systems* – 2020. – Vol. 17, Iss. 3. – P. 1–24. <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>
8. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения: монограф. в 2 т. Т. 2. Совершенствование сотовых заполнителей и конструкций технологическими методами / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, О.А. Карпикова, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2015. – 247 с.
9. Двейрин А.З. Анализ эффективности внедрения интегральных конструкций с трубчатыми элементами из полимерных композиционных материалов / А.З. Двейрин, Е.В. Майорова // *Вопросы проектирования и*
10. Zaid N.Z.M. Sandwich structure based on corrugated-core: a review / N.Z.M. Zaid, M.R.M. Rejab, N.A.N. Mohamed // *MATEC Web Conf*. – 2016. – Vol. 74. – 6 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167400029>
11. Панин В.Ф. Конструкции с заполнителем / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
12. Zhang J. Design and fabrication of formable CFRTP core sandwich sheets / J. Zhang, J. Yanagimoto // *CIRP Ann Manuf Technol* – 2019. – Vol. 68, Iss. 1. P. 281–284. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.060>
13. Xu G. Mechanical response of carbon/epoxy composite sandwich structures with three-dimensional corrugated cores / G. Xu, Z. Wang, T. Zeng, S. Cheng, D. Fang // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 156. P. 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.01.015>
14. Mackerle J. Finite element analyses of sandwich structures: a bibliography (1980–2001) / J. Mackerle // *Engineering Computations* – 2002. – Vol. 19, No. 2. – P. 206–245. <https://doi.org/10.1108/02644400210419067>
15. Caliri M.F. A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the finite element method / M.F. Caliri, A.J.M. Ferreira, V.A. Tita // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 156. P. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.036>
16. Гайдачук В.Е. Концептуальный подход к формированию физико-механических характеристик сэндвичевых структур композитных конструкций ракетно-космической техники / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2014. – Вып. 66. – С. 27–36.
17. Прочность, устойчивость, колебания: справочник Т. 2. / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.
18. Гайдачук А.В. Экспериментально-теоретическая методика определения физико-механических характеристик и прочностных свойств сэндвичевой трубчатой структуры из ПКМ / А.В. Гайдачук, Е.В. Майорова, А.А. Чумак // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 6(103). – С. 25–31.
19. Saidani M. Experimental investigation of honeycomb constructional elements / M. Saidani, M.W.L. Roberts // *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. – 2006. – Vol. 7, no. 5. – P. 479–486. <https://ajce.bhrc.ac.ir/Portals/25/PropertyAgent/2905/Files/6277/479.pdf>
20. Гайдачук В.Е. Приведенные физико-механические характеристики трубчатого заполнителя для трехслойных конструкций летательных аппаратов / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2009. – Вып. 44. – С. 67–78.
21. Кондратьев А.В. Численное определение приведенных упругих физико-механических характеристик трубчатого заполнителя / А.В. Кондратьев, Е.В. Майорова, А.А. Чумак // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2012. Вып. 1 (69). – С. 70–79.

22. Проектування інтегральних тришарових авіаконструкцій з полімерних композиційних матеріалів із трубчастим заповнювачем : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 - проектування, виробництво і випробування літальних апаратів / К. В. Майорова; М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харк. авіац. ін-т" ; наук. кер. Кондратьєв А.В. – Харків, 2016. – 184 с.
23. Xiong J. Fabrication and mechanical behavior of carbon fiber composite sandwich cylindrical shells with corrugated cores / J. Xiong, L. Feng, R. Ghosh, H. Wu, L. Wu, L. Ma, A. Vaziri // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 156. P. 307–319. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.009>
24. Ендогур А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
25. Vasiliev V.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials* / V.V. Vasiliev, E.V. Morozov. – Elsevier, 2007. – 504 p.
26. Синтез рациональных конструктивно-технологических решений углепластиковых формразмеростабильных конструкций космического назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 - проектирование, пр-во и испытания летат. аппаратов : заощиц. 18.12.15 / М. Е. Харченко ; М-во образования и науки Украины, Днепропетр. нац. ун-т им. О. Гончара ; науч. рук. Санин А. Ф. – Днепропетровск, 2015. – 189 с.
27. Сливинский В.И. Влияние схемы армирования наполнителя на свойства углестопласта / В.И. Сливинский, А.В. Кондратьев, М.Е. Харченко // *Композитные материалы*. – 2012. – Т.6, № 1. – С. 33–40.
28. Сливинский В.И. Анализ методов механических испытаний сотовых наполнителей на сдвиг / В.И. Сливинский // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2000. – Вып. 18(1). – С. 68–77.
29. Сливинский В.И. Анализ стандартных методов механических испытаний сотовых наполнителей на поперечное растяжение и сжатие / В.И. Сливинский // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 1999. – Вып. 16(3). – С. 25–37.
30. Гайдачук В.Е. Корректировка существующих аналитических зависимостей физико-механических характеристик сотового наполнителя с учетом его высоты // В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2008. – Вып. 40. – С. 5–12.

References

1. Birman V., George A. Kardomateas (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>
2. Yanes-Armas S., J. De Castro, Keller T. (2017). Long-term design of FRP-PUR web-core sandwich structures in building construction. *Composite Structures*, 181, 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.089>
3. Elfaki I., Abdalgadir S. (2020). Composite sandwich structures in advanced civil engineering applications – a review. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 6, 259–262.
4. Ding K.W., Wang G., Yin W.Y. (2013). Application of composite sandwich panels in construction engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 291 – 294, 1172–1176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.291-294.1172>
5. Manalo A., Aravinthan T., Fam A., Benmokrane B., Manalo A. (2016). State-of-the-art review on FRP sandwich systems for lightweight civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 21, 1, 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000729](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000729)
6. Petrova E.A., Kalmykov O.A. (2015). К оценок предельных состояний трехслойных сэндвич-панелей. *Комунальне господарство мист*, 121, 38–41.
7. Feng Y., Qiu H., Yicong Gao, Hao Zheng, Tan J. (2020). Creative design for sandwich structures: a review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17, 3, 1–24. <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>
8. Gajdachuk A.V., Gajdachuk V.E., Karpikova O.A., Kirichenko V.V., Kondratiev A.V. (2015). *Sotovyie zapolniteli i panel'nye konstrukcii kosmicheskogo naznachenija*. Kharkiv, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute Publ., 2, 247.
9. Dvejrin A.Z., Majorova E.V. (2011). Analiz jeffektivnosti vnedre-nija integral'nyh konstrukcij s trubchatymi jelementami iz polimernyh kompozicionnyh materialov. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsii letatel'nykh apparatov*, 4(68), 65–77.
10. Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Mohamed N.A.N. (2016). Sandwich structure based on corrugated-core: a review. *MATEC Web Conf*, 74, 6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167400029>
11. Panin V.F., Gladkov Ju.A. (1991). *Konstrukcii s zapolnitelem*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 272.
12. Zhang J., Yanagimoto J. (2019). Design and fabrication of formable CFRTP core sandwich sheets. *CIRP Ann Manuf Technol*, 68, 1, 281–284. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.060>
13. Xu G., Wang Z., Zeng T., Cheng S., Fang D. (2018). Mechanical response of carbon/epoxy composite sandwich structures with three-dimensional corrugated cores. *Composites Science and Technology*, 156, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.01.015>
14. Mackerle J. (2002). Finite element analyses of sandwich structures: a bibliography (1980–2001). *Engineering Computations*, 19, 2, 206–245. <https://doi.org/10.1108/02644400210419067>
15. Caliri M.F., Ferreira A.J.M., Tita V.A. (2016). A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the finite element method. *Composite Structures*, 156, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.036>
16. Gajdachuk V.E., Kirichenko V.V., Kondratiev A.V. (2014). Konceptual'nyj podhod k formirovaniju fiziko-mehaničeskikh harakteristik šendvičevykh struktur kompozitnyh konstrukcij raketno-kosmičeskoj tehniky. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 66, 27–36.
17. *Prochnost', ustojčivost', kolebanija*: spravocnik (1968). Ed. Birger I.A., Panovko Ja.G.. Moscow: Mashinostroenie Publ., 463
18. Gajdachuk A.V., Majorova E.V., Chumak A.A. (2013). Jeksperimental'no-teoretičeskaja metodika opredelenija fiziko-mehaničeskikh harakteristik i prochnostnyh svojstv

sjendvichevoj trubchatoj struktury iz PKM. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 6(103), 25–31.

19. Saidani M., Roberts M.W.L. (2006). Experimental investigation of honeycomb constructional elements. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7, 5, 479–486. <https://ajce.bhrc.ac.ir/Portals/25/PropertyAgent/2905/Files/6277/479.pdf>

20. Gajdachuk V.E., Kondratiev A.V., Omel'chenko E.V. (2009). Privedennye fiziko-mehaničeskie harakteristiki trubchatogo zapolnitelja dlja trehslojnyh konstrukcij letatel'nyh apparatov, *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 44, 67–78.

21. Kondratiev A.V., Majorova E.V., Chumak A.A. (2012). Chislennoe opre-delenie privedennyh uprugih fiziko-mehaničeskikh harakteristik trubchatogo zapolnitelja. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksii letatel'nykh apparatov*, 1(69), 70–79.

22. Majorova K. V. (2016). *Proektivannyya integral'ny`x try`sharovy`x aviakonstruksij z polimerny`x kompozy`cijny`x materialiv iz trubchasty`m zapovnyuvachem*. Dy`s. ... kand. tehn. nauk 05.07.02. Nacz. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo "Xark. aviacz. in-t". Kharkiv, 184.

23. Xiong J., Feng L., Ghosh R., Wu H., Wu L., Ma L., Vaziri A. (2016). Fabrication and mechanical behavior of carbon fiber composite sandwich cylindrical shells with corrugated cores. *Composite Structures*, 156, 307–319. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.009>

24. Endogur A.I., Vajnberg M.V., Ierusalimskij K.M. (1986). *Sotovye konstrukcii. Vybor parametrov i proektirovanie*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 200.

25. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials*. Elsevier, 2007. 504.

26. Harchenko M.E. (2015). *Sintez racional'nyh konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij ugleplastikovyh*

formorazmerostabil'nyh konstrukcij kosmicheskogo naznachenija. Dis. ... kand. tehn. nauk 05.07.02. Dnepropetr. nac. un-t im. O. Gonchara. Dnepropetrovsk, 189.

27. Slivinskij V.I., Kondratiev A.V., Harchenko M.E. (2012). Vlijanie shemy armirovaniya napolnitelja na svojstva uglesotoplasta. *Kompozitnye materialy*, 6, 1, 33–40.

28. Slivinskij V.I. (2000). Analiz metodov mehaničeskikh ispytanij sotovyh zapolnitelej na sdvig. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksii letatel'nykh apparatov*, 1(18), 68–77.

29. Slivinskij V.I. (1999). Analiz standartnyh metodov mehaničeskikh ispytanij sotovyh zapolnitelej na poperechnoe rastjazhenie i szhatie. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksii letatel'nykh apparatov*, 3(16), 25–37.

30. Gajdachuk V.E., Kirichenko V.V., Kondratiev A.V. (2008). Korrektirovka sushhestvujushchih analiticheskikh zavisimostej fiziko-mehaničeskikh harakteristik sotovogo zapolnitelja s uchetom ego vysoty. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 40, 5–12.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Воронько, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: КОНДРАТЬЄВ Андрій Валерійович доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова E-mail – andrii.kondratiev@kname.edu.ua ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>

ANALYSIS OF ANALYTICAL MODELS AND THE DEPENDENCES REALIZED BY THEM FOR DEFINITION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE FILLERS

A. Kondratiev

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The analysis of the accuracy of analytical models and the mechanical properties they implement is carried out for various types of composite aggregates of sandwich structures. The accuracy assessment of approximate analytical dependencies of the mechanical characteristics of the composite honeycomb core is given. The applicability of analytical dependencies at the initial stages of the design of cellular structures is established. The accuracy of the results of a numerical experiment is noted. This is due to the approximate nature of standard test methods. Both for the elastic modulus and for the shear moduli, their values obtained on the basis of information technologies of finite element analysis exceed their corresponding values determined by analytical dependencies. This excess over the corresponding analytical values for the shear moduli is close to a constant value for various reinforcement angles and does not exceed 1.14. For the elastic modulus of the first kind, the excess varies from 1.03 to 1.8 for various angles of cell reinforcement. The analytical dependences of the reduced mechanical characteristics of the tubular aggregate are obtained. The idea of the method for determining the mechanical characteristics of a tubular filler is to fulfill the requirement of equality of the relative axial and shear deformations of a conventional continuous type element and a real one, selected within one tube, taking into account only its material. The conclusion is drawn that the mechanical characteristics of the tubular aggregate, determined by the analytical model, to different degrees differ from the corresponding characteristics obtained on the basis of information technology of finite element analysis. Moreover, the difference in the elastic moduli of the first kind is much smaller than in the shear moduli. The reasons for these discrepancies are analyzed. It is justified and recommended to use constant correction factors for the analytical values of the reduced mechanical characteristics of the tubular aggregate, allowing their further use in the calculation of plate and shell sandwich structures.

Keywords: sandwich constructions, mechanical properties, cellular and tubular fillers.