

УДК: 678.074

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РЕШІТЧАСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛІУРЕТАНУ

Вербило Д.Г.¹, Пилипенко А.М.², Сова Н.В.³, Савченко Б.М.³, Чишко В.В.²

¹ *Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ*

² *Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, м. Київ*

³ *Київський національний університет технологій та дизайну*

Static and dynamic mechanical properties of lattice materials (with different cell geometry) were investigated experimentally on the basis of thermoplastic polyurethane obtained by the layer-by-layer melt deposition method. Samples are characterized by significant anisotropy of mechanical characteristics depending on the direction of printing and the application of load. Physical mechanisms of observed differences in properties are discussed.

Вступ

На сьогодні значна увага приділяється отриманню та дослідженню решітчастих матеріалів, які мають безліч складних топологічних варіацій структур зі строго заданими формою і розміром комірок[1-3]. Найбільш доцільним шляхом їх отримання є використання адитивних технологій, зокрема методу пошарового накладання розплаву (FDM), який є самим поширеним і дозволяє варіювати параметри процесу (а отже і кінцевий результат) в широких межах[4-5].

В даній роботі досліджено вплив орієнтації зразка при 3D- друці та напрямку прикладання навантаження на статичні та динамічні механічні властивості решітчастих матеріалів на основі TPU, одержаних FDM.

Матеріали та методи досліджень

В якості вихідного матеріалу використовували термопластичний поліуретан (TPU). Для забезпечення якісного 3D друку на етапі формування мононитки TPU змішували з 5 ваг.% концентрату ударостійкого полістиролу з метою підвищення жорсткості нитки.

У програмі для 3D моделювання створювали моделі прямокутної комірки з розмірами 2,1x2,1 мм² і товщиною стінок 0,875 мм і

взаємопроникних відкритих шестикутних комірок розмірами 3 і 6 мм і товщиною стінок 0,36 мм. Модель решітчастого матеріалу з квадратними комірками орієнтували в просторі в трьох положеннях (вертикально, горизонтально та під кутом 45°); з шестикутними комірками – горизонтально. Прямокутні зразки виготовляли методом FDM з використанням 3D принтера Flashforge Creator pro з наступними налаштуваннями: діаметр сопла 0,3 мм, швидкість друку – 20 мм/с, температура екструдеру – 245 °С, температура столу (скло) – 90 °С. Товщина та висота шару матеріалу становили 0,36 мм та 0,2 мм, відповідно.

Випробування на статичний 3-х точковий вигин проводили при кімнатній температурі на універсальній електромеханічній випробувальній машині UTM-100 зі швидкістю руху траверси 10 мм/хв. В'язкопружні характеристики досліджували методом динамічного механічного аналізу (ДМА) на приладі DMAQ800 в режимі деформації одинарного консольного вигину при частоті вимушених синусоїдальних коливань 1 Гц в інтервалі температур від 30 до 160 °С зі швидкістю нагрівання 3 град/хв.

Результати та обговорення

1.1 Статичний вигин

В табл. 1 наведені дані про поведінку механічних властивостей решітчастих матеріалів, сформованих з використанням FDM-процесу, в залежності від напрямку друку та прикладання навантаження. Тут E – модуль пружності, σ_{\max} – максимальне напруження, ϵ_b – деформація руйнування.

У зразках решітчастого матеріалу з квадратними комірками спостерігається анізотропія механічних властивостей в залежності від напрямку друку і прикладання навантаження. При одному і тому ж напрямку прикладання навантаження значення E і σ_{\max} вище в зразках з горизонтальним і вертикальним укладанням шарів в порівнянні з тими, де шари полімеру розташовувалися під кутом 45° до осі зразка. При цьому величина ϵ_b значно (до 10 разів) вище за таку, ніж в зразках, надрукованих під кутом 45°. Кращий

комплекс властивостей (незалежно від напрямку прикладання навантаження) демонструють зразки, надруковані горизонтально (табл. 1).

Таблиця 1 – Механічні властивості решітчастих матеріалів

Напрямок друку	Прикладання навантаження ⊥ площині		E, ГПа	ϵ_b , %	σ_{max} , МПа
квадратні комірки					
горизонтально	XY		0,21	21,0	7,5
горизонтально	XZ		0,24	25,8	8,0
під кутом 45°	XY		0,14	5,8	4,8
під кутом 45°	XZ		0,04	3,6	2,3
вертикально	YZ		0,11	2,1	3,8
вертикально	XZ		0,17	1,8	4,5
шестикутні комірки					
горизонтально			0,04	13,6	1,4

Слід відмітити, що механічні властивості зразків, надрукованих горизонтально, в залежності від напрямку прикладання навантаження є майже ізотропними. В той же час дві інші просторові орієнтації демонструють значну анізотропію. Даний факт пояснюється тим, що при горизонтальній орієнтації зразка при друку зміна на 90° напрямку навантаження не змінює його орієнтацію щодо полімерних шарів, на відміну від зразків, надрукованих вертикально та під кутом 45°.

У випадку зразків, надрукованих горизонтально, міцність на розтягування горизонтальних елементів структури вище, ніж у орієнтованих при друку під кутом 45° і вертикально. Це обумовлено тим, що в останніх двох випадках

руйнування елементів відбувається не шляхом розриву полімерних шарів, а через їх взаємне проковзування і відшаровування, тобто шляхом розриву зв'язків між ними. Тому при горизонтальній орієнтації при порівняно малій деформації зрізаються вертикальні елементи, в той час як горизонтальні залишаються цілими. В результаті, матеріал отримує можливість деформуватися шляхом зсуву і зближення між собою горизонтальних елементів.

Зразки решітчастого матеріалу з шестикутними комірками характеризуються значно меншими значеннями E , σ_{001} , σ_{02} та σ_{\max} при порівняній ϵ_b (табл. 1). Така поведінка обумовлена відмінностями внутрішньої архітектури матеріалу, а саме тим, що внаслідок значно меншої товщини стінки (в порівнянні з матеріалом з квадратними комірками) вони можуть втрачати стійкість шляхом утворення складок. Це знижує модуль пружності і міцність решітчастого матеріалу з шестикутними комірками, проте збільшує деформацію всієї конструкції до моменту руйнування стінок.

1.2 Динамічний механічний аналіз

На рис. 1 наведено в'язкопружні властивості решітчастих матеріалів, одержаних FDM-процесом. На температурних залежностях модуля втрат E'' та тангенса кута механічних втрат $\text{tg}\delta$ решітчастих матеріалів з квадратними комірками реєструються відомі максимуми, обумовлені процесом розклування полістиролу. Положення максимумів незначно відрізняються в залежності від орієнтації зразків при друку, тобто напрямок друку слабо впливає на температуру переходу в скловидний стан. В той же час динамічні модулі пружності E' та втрат E'' вище у випадку горизонтальної орієнтації, що корелює з даними випробувань на статичний вигин. Значення дисипації енергії (механічні втрати), яке характеризується висотою максимуму $\text{tg}\delta$, не залежить від напрямку друку. У випадку решітчастих матеріалів з шестикутними комірками дані ДМА також добре узгоджуються з результатами статичних випробувань, демонструючи аналогічні закономірності.

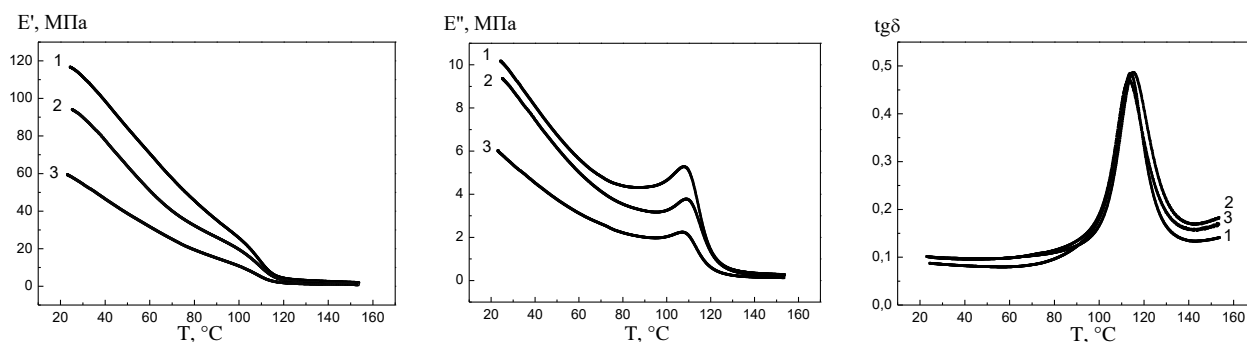


Рисунок 1 – В'язкопружні властивості решітчастих матеріалів з квадратними комірками, надрукованих горизонтально (1), вертикально (2) і під кутом 45° (3)

Висновки

Досліджено вплив геометрії комірки, напрямку друку та прикладання навантаження на статичні та динамічні механічні властивості решітчастих матеріалів на основі TPU, одержаних FDM. Показано, що вони характеризуються сильною анізотропією механічних властивостей в залежності від напрямку друку та прикладання навантаження. Це обумовлено зміною механізму руйнування при деформації від розриву зв'язків між полімерними шарами через їх взаємне проковзування і відшаровування до розриву самих полімерних шарів. Кращий комплекс механічних властивостей (незалежно від напрямку прикладання навантаження) демонструють зразки решітчастих матеріалів на основі TPU з квадратними комірками, надруковані в горизонтальній площині.

Література

1. A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby, H.N.G. Wadley The topological design of multifunctional cellular materials // Progress in Materials Science. – 2001. – Vol. 46. – P. 309-327.
2. Y.-Z. Yang, J.-L. Yang, T. Zheng, D.-N. Fang Progress in research work of light materials // Chinese Quarterly of Mechanics. – 2007. – Vol. 28, №4. – P. 503-516.

3. D. Levy, A. Shirizly, and D. Rittel, “Static and dynamic compressive response of additively manufactured discrete patterns of Ti6Al4V,” *Int. J. Impact Eng.*, 2018
4. C. M. Bidan, F. M. Wang, and J. W. C. Dunlop, “A three-dimensional model for tissue deposition on complex surfaces,” *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 16, no. 10, pp. 1056–1070, 2013.
5. Mehrdad Mohsenizadeh, Federico Gasbarri, Michael Munther, Ali Beheshti, Keivan Davami, Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption // *Materials & Design*, Volume 139, 2018, Pages 521-530