

МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНОГО FDM-ДРУКУ З МОДИФІКУВАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Дудукалов Ю.В., к.т.н., доцент, Ковальов Б.В., магістр,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Виконана оптимізація комбінованого процесу FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів. Показана послідовність застосування методу аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки з урахуванням різних факторів.

Ключові слова: FDM-друк, модифікування, міцність, пластичність, електромагнітне поле, полімерні матеріали, багатокритеріальна оптимізація.

METHOD OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION COMBINED FDM PRINTING WITH MODIFICATION POLYMER MATERIALS

Yu.V. Dudukalov, Ph.D., associate professor, B.V. Kovalev, student,
Kharkiv National Automobile and Road University

Abstract. Optimization of the combined process of FDM printing with modification of polymer materials has been carried out. The sequence of application of the method of analysis of hierarchies for multi-criterial evaluation, taking into account various factors, is shown.

Key words: FDM printing, modification, strength, plasticity, electromagnetic field, polymer materials, multi-criteria optimization.

Вступ

Розроблення нових перспективних полімерів, полімерних композиційних матеріалів пов'язано із інноваціями останнього часу. До одного з найбільш актуальних технологічних трендів відносяться адитивні технології, в яких поширене нарощування матеріалу відповідно до заданої комп'ютерної твердотільної моделі практично замінює традиційні процеси різання, пресування і штампування [1, 2]. Основною перевагою даних технологій є пряме відтворення на основі твердотільної моделі виробу будь-якої складності без застосування додаткового оснащення.

Застосування 3D-принтерів охоплює дуже широку сферу діяльності. Область використання 3D-друку розширюється, удосконалюються методи друку, знаходять застосування нові матеріали, поліпшується якість, точність і міцність виробів. Принтери для тривимірного друку зменшуються в розмірах, стають доступнішими, потребують мінімальних витрат в експлуатації. У зв'язку з цим технологічні процеси 3D-друку для виробництва деталей є перспективними.

Аналіз публікацій

Вважається, що застосуванню полімерних матеріалів у виробництві дорожньо-будівельної техніки [3, 4], в ряді вузлів на існує альтернативи. У той же час, незважаючи на бурхливий розвиток зазначених технологій, актуальною проблемою залишається недостатня міцність виробів, що одержані шляхом 3D-друку [5 – 7]. Це стримує їх застосування в виробництві технічних систем, не дає можливості реалізувати їх потенційні можливості. Перспективним рішенням даної проблеми є модифікування структури як основного, так і армованого полімерного матеріалу шляхом додаткових електрофізичних впливів, наприклад, в електромагнітному полі. Такі рішення є багатоваріантними, потребують врахування багатьох факторів.

Таким чином, вирішення питань обґрунтування вибору полімерних матеріалів і способу модифікування для зміцнення в технологіях 3D-друку деталей машин, являє собою актуальну задачу наукового і практичного плану.

Застосування аналітичних формалізованих методів обґрунтованого вибору полімерного матеріалу і їх способу модифікування для конструкційних елементів в адитивних технологіях підвищує достовірність і надійність одержаних результатів. Для обґрунтованого вибору потрібно враховувати широку сукупність критеріїв. Оскільки оцінки властивостей матеріалів для конструкційних елементів, вплив способу модифікування можуть мати кількісні та якісні характеристики, то найбільш доцільно для аналітичного формалізованого обґрунтування використовувати експертні методи, які передбачають ранжування об'єктів за сукупністю параметрів.

До багатокритеріальних методів прийняття рішень відносять SWOT-аналіз і методи аналізу ієрархій. В нашому випадку SWOT-аналіз представляє собою узагальнену оцінку технологічного середовища [8], в якому функціонує машинобудівне підприємство. Ця модель матричного аналізу допомагає виділити перешкоди, що постають перед впровадженням технологій 3D-друку. На основі таких досліджень приймаються рішення, в яких акцент робиться на визначенні проблем організаційно-технологічного характеру.

Для підготовки методики багатокритеріального вибору полімерних матеріалів і способів їх модифікування був задіяний підхід, в основу якого покладена ідея методу аналізу ієрархій, що запропонована Томасом Сааті [9]. В цьому методі використовується процедура попарного порівняння елементів, а для полегшення суджень експертів про важливість об'єктів використовується спеціальна 9-бальна шкала відносної важливості двох об'єктів, що порівнюються. Метод аналізу ієрархій пройшов всебічну апробацію від рішення проблем національного розвитку країн до приватних задач, і отримав високу оцінку фахівців. Мета дослідження – виконати оптимізацію комбінованого процесу FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів високочастотним електромагнітним імпульсним полем (ВЕІП) із застосуванням методу аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки різних факторів.

Основні матеріали досліджень

Для реалізації всього комплексу властивостей полімерних матеріалів необхідно забезпечити міцну взаємодію матриці і наповнювача по всій площі їх контакту. Властивості матеріалу на кордоні розділу матриця-наповнювач істотно відрізняються від властивостей кожного з цих компонентів. Досить часто, цей міжфазовий шар є найбільш слабким місцем, і саме по цій межі починається руйнування матеріалу.

В ході експериментальних досліджень нами доведено, що обробка високочастотним електромагнітним імпульсним полем (при частоті – $f = 2,25$ МГц і напруженості – $H = 1265$ А/м) приводить до поліпшення когезійних властивостей. Встановлено оптимальну тривалість обробки високочастотним полем АБС-пластиків, наповнених частками сталі 45 – $t = 5 \dots 10$ хв. За такого режиму модифікування спостерігали підвищення модуля пружності з $E = 3,5$ ГПа (для вихідного матеріалу) до $E = 3,9 \dots 4,20$ ГПа (після модифікування). Аналогічно, руйнівні напруження при згинанні збільшуються від $\sigma_{зг} = 45$ МПа (для вихідного матеріалу) до $\sigma_{зг} = 52 \dots 56$ МПа (після модифікування).

Для обґрунтованого вибору полімерного матеріалу, способу модифікування потрібно враховувати широку сукупність критеріїв. В якості таких критеріїв можуть прийматися технічні параметри, експлуатаційні, економічні показники та інші характеристики, що відображають кількісні та якісні результати виготовлення зміцнених конструкцій, за якими проводять порівняння.

На основі аналізу наукових і виробничих даних, результатів експериментальних досліджень нами взятий наступний набір основних критеріїв для обґрунтування вибору в конкретній ситуації застосування адитивних технологій на базі використання 3D-принтерів в якості технологічного обладнання:

- оцінка сукупної продуктивності праці, яку забезпечує використання способу модифікування ПКМ для 3D-принтеру;
- швидкість витікання ПКМ, враховуючи спосіб модифікування та молекулярну масу полімерного матеріалу;
- витрати часу для реалізації способу модифікування ПКМ, враховуючи всі стадії модифікування ПКМ;
- можливість фінішної обробки (фарбування, підгонка, фіксація деталей) після модифікування ПКМ;
- можливість суміщення процесів модифікування ПКМ і 3D-друку для підвищення продуктивності;
- міцність самого ПКМ з наповнювачем та пошарового скріплення в структурі проходів, реалізація способу модифікування ПКМ;
- міцність фіксації виробу за допомогою адгезії на столі 3D принтеру під час друку;
- екологічні властивості, безпека використання способу модифікування ПКМ;

- вартість ПКМ для друку на 3D-принтері;
- сукупна вартість технологічного обладнання для друку на 3D принтері, необхідність додаткових капітальних вкладень у виробництво [11].

Оцінка важливості критеріїв за методом аналізу ієрархій здійснюється шляхом їх попарних порівнянь. При порівнянні двох критеріїв використовується шкала відносної важливості. Заповнення матриці виконується по рядкам, порівнюючи елемент, розташований в рядку, з елементом, розташованим у стовпці.

При проведенні попарних порівнянь двох елементів матриці для двох критеріїв ставляться наступні питання:

- який з критеріїв має більший вплив на прийняття рішення про вибір технології;
- яка перевага одного критерію над іншим з позицій запропонованої шкали оцінок.

При визначенні вектору пріоритетів та оцінюванні узгодженості результатів, визначають пріоритети, які представляють відносну важливість або перевагу елементів на кожному рівні ієрархічної моделі. Для підвищення об'єктивності отриманих результатів заповнення матриці може здійснювати шляхом колективного обговорення списку критеріїв і результатів парного порівняння елементів матриці.

Для аналізу були вибрані наступні полімерні матеріали і способи модифікування для 3D-друку:

- 1) Спосіб 1. ВЕІП на протязі 10 хвилин для АВС-пластику без наповнювача, не буде проблем з прилипанням до столу;
- 2) Спосіб 2. ВЕІП на протязі 1 хвилини для АВС-пластику з наповнювачем частками сталі 45, не буде проблем з прилипанням до столу, деламінацією та деформацією виробу;
- 3) Спосіб 3. ВЕІП на протязі 10 хвилин для АВС-пластику з наповнювачем частками сталі 45, не буде проблем з прилипанням до столу, деламінацією та деформацією виробу;
- 4) Спосіб 4. ВЕІП на протязі 10 хвилин для АВС-пластику з наповнювачем частками сурику (50 мас.ч.), не буде проблем з прилипанням до столу, деламінацією та деформацією виробу;
- 5) Спосіб 5. ВЕІП на протязі 1 хвилина для АВС-пластику з наповнювачем частками сурику (50 мас.ч.), не буде проблем з прилипанням до столу, деламінацією та деформацією виробу.

Використовується шкала оцінювання для способів модифікування за критеріями, враховуються експериментальні дані, пропозиції виробників та досвід фактичного застосування.

Виконуються розрахунки оцінок власних векторів оцінок критеріїв, проводиться їх нормалізація.

На заключному етапі обчислюється індекс узгодженості:

$$IY = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}, \quad (1)$$

де λ_{\max} – найбільше власне значення матриці суджень; m – число порівнюваних критеріїв.

Також розраховується відношення узгодженості. Для цього потрібно розділити індекс узгодженості IY на середнє значення випадкової узгодженості матриці такого ж порядку CC_n :

$$OC = \frac{IY}{CC_n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де CC_n – випадкова узгодженість, яка приймається по таблиці для матриці порядку n .

Результати розрахунків узагальнених пріоритетів порівнюваних технологій з вказаними способами модифікування наведені на діаграмі (рис. 1).

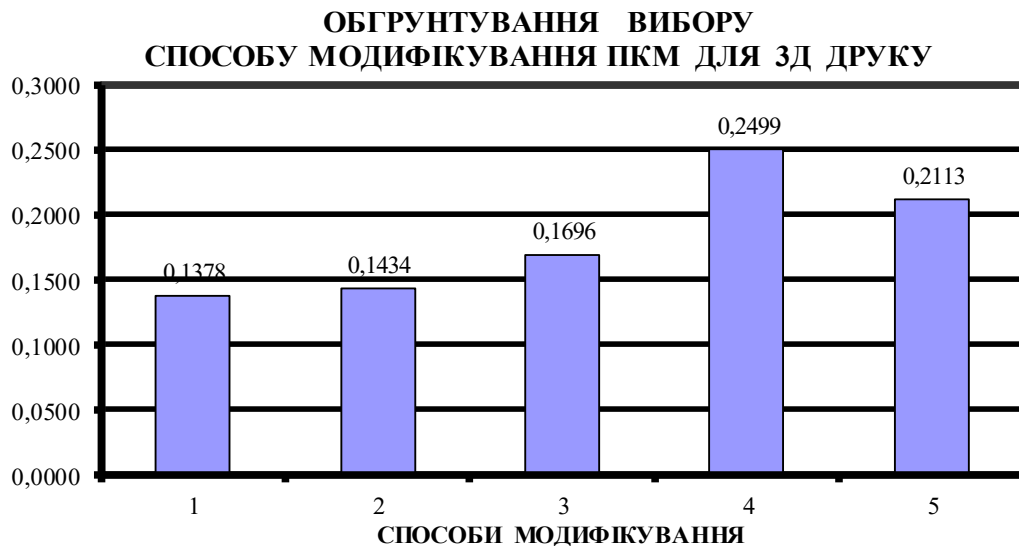


Рисунок 1 – Пріоритети аналітичного обґрунтування вибору способу модифікування ПКМ

Таким чином, всі розрахунки за даною методикою виконуються в середовищі пакета Excel. Програма розроблена на кафедрі «Технології металів і матеріалознавства» ХНАДУ.

Висновки

1. Результати досліджень дають змогу виконати багатокритеріальну оптимізацію комбінованого FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів в конкретних виробничих умовах. Результати розрахунків свідчать про ефективність запропонованих варіантів модифікування полімерних матеріалів в технологіях ЗД-друку і обґрунтованість прийнятих рішень.

2. Розроблена методика багатокритеріальної оптимізації на основі процедури методу аналізу ієрархій для формалізованого системного обґрунтування вибору полімерних матеріалів і способів їх модифікування створює умови для ефективного застосування FDM-технологій друку деталей в машинобудівному і ремонтному виробництві.

Література

1. Технологии 3D-печати, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml. – Дата доступа: 20.11.2021.

2. Глушкова Д. Б. Вплив різних видів поверхневої обробки на стан поверхні тертя / Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова, Е. А. Нестеренко // Дні науки 2012: матеріали 8-й Міжнар. наук.-практ. конф. – Прага, 2012. Т. 89. С. 53 – 58.

3. Тимошков П.Н. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения / П.Н.Тимошков, Д.И. Коган//Труды ВИАМ. – 2013.– №4. – С. 114 – 126.

4. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку/ О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: Політехніка, 2015. – 295 с.

5. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method / T. Nomura, E.M. Dede, T. Matsumori, A. Kawamoto // Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization - Proceedings of the 11th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11). – The University of Sydney, Australia, 2015. – P. 728 – 733.

6. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D.L. Bourell, J.J. Beaman, M.C. Leu, D.W. Rosen // Proceedings of Rapid Tech. 2009: US - Turkey Workshop on Rapid Technologies. - Istanbul, 2009. – P. 1 – 8.

7. Антонов Ф. 3D-печать композитив: тренди, перспективи, застосування [Электронный ресурс]. – Режим доступа: - <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyu-stol-additive-tekhnologii-luchshie-praktiki/>. – Дата звернення: 28.11.2021.

8. Мех О.А. Можливості вдосконалення методики SWOT-аналізу / О.А. Мех // Наука та наукознавство. – 2012. – № 1. – С. 21 – 26.

9. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем.// Томас Саати, Кернс Кевин. пер. с англ. Вачнадзе Р.Г. под ред. Ушакова И.А.– М. «Радио и связь», 1991. – 224 с.

10. Бадюл М. Г. Застосування методу аналізу ієрархій у проектуванні та будівництві. / М. Г. Бадюл, В. А. Крамаренко // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. 2013. – Вип. 70. – С. 27-35.

11. Тернюк Н.Э. Системно-процессное моделирование технических систем в CALS-технологиях / Н.Э. Тернюк, Ю.В. Дудукалов, В.В. Федченко, Н.Н. Гладкая // Сборник научных трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии», Вып. 49. X., 2011 С. 124 – 133.