

Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів

О.Ф. Саленко, В.М. Орел, Г.В. Габузян, А. Костенко, Д. Цуркан

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація.** Розглядається процес FDM-друку з точки зору забезпечення міцності (у тому числі, довготривалості) відтворюваних деталей. Особливість процесу полягає у тому, що при формуванні деталі виникають нещільні структури, в яких формуються дефекти трьох типів (дефекти структури, дефекти процесу і дефекти матеріалу), що в подальшому ведуть до утворення тріщин, спроможних порушити цілісність виробу в цілому. Серед ряду факторів, обумовлюючих розвиток адгезійних пошкоджень, одним із важливих є фактор температури розплаву, пов'язаний із температурою екструдера. Створено модель для визначення обумовленості температури філаменту, екструдованого на стіл, температурою в екструдері, яку додатково ідентифіковано шляхом теплометричних вимірів. Отримано залежності параметрів міцності при розтягуванні від температури розплаву.*

Ключові слова: FDM-друк, міцність, температурні поля

Активний розвиток композиційних матеріалів, у тому числі, на полімерній основі, розкриває значні перспективи і у царині адитивних засобів виробництва. При цьому сам матеріал може формуватися як попередньо (наприклад, сумішшю порошків [1], складом філаменту [2], так і у процесі екструзії або викладки [3]. У результаті вдається збільшити міцність на 20–40 %, підвищивши також і анізотропію властивостей, зокрема різницю між E_x , E_y , E_z ; σ_x , σ_y , σ_z , [2]. Іншим чинником підвищення міцності є зміна топології викладання філаменту, або умов формування мікро об'ємів друкованої заготовки [4]. Наразі активно розвивається робота щодо створення полімерних принтерів із кількома додатковими осями, [5,6]. Для осесиметричних оболонок є достатньо прості рішення, наведені зокрема, у [6]. Відхід від планарного викладання філаменту також дозволяє підвищити міцність друкованих виробів, зокрема, на 15–30 %, [7].

Дослідження, результати яких наведені нами у [8], дозволили сформулювати ряд основних положень механіки руйнування тонкостінних виробів (оболонок), сформованих методом FDM. Так, показано, що руйнування адитивних конструкцій розпочинається із розвитку дефектів, які формуються у процесі створення виробу і які умовно можна поділити на:

- 1) дефекти структури, сформовані у процесі викладки філаменту і які передбачаються самим процесом;
- 2) дефекти процесу, які носять випадковий характер та пов'язані із дією зовнішніх чинників та умов формування;
- 3) дефекти матеріалу, які проявляються в наявності в матеріалів певних включень, забруднень, а також наявності водяної пари, що відіграє роль активного збурювача плавлення та застигання пластику.

Підсумкові значення $[\sigma]$, δ , визначатимуться проявом усіх трьох груп дефектів.

На інтенсивність зародження та розвитку дефектів впливає велика кількість діючих факторів. Одним із найбільш важливих, відповідно до [8], є температура пластику після екструдера, яка обумовлює явища у зоні вичавлювання філаменту та його застигання на робочому столі, внаслідок чого утворюються площинки адгезійного зчеплення. Опосередковано ця температура визначається температурою нагрівача екструдера, однак внаслідок дії інших чинників може змінюватися у досить широких межах.

Формування смуг (площинок) адгезії, які після повного застигання забезпечують міцність з'єднання, відбувається внаслідок прояву тепло- та масообмінних процесів, динаміка яких визначається температурою розплаву полімеру в трубці екструдера.

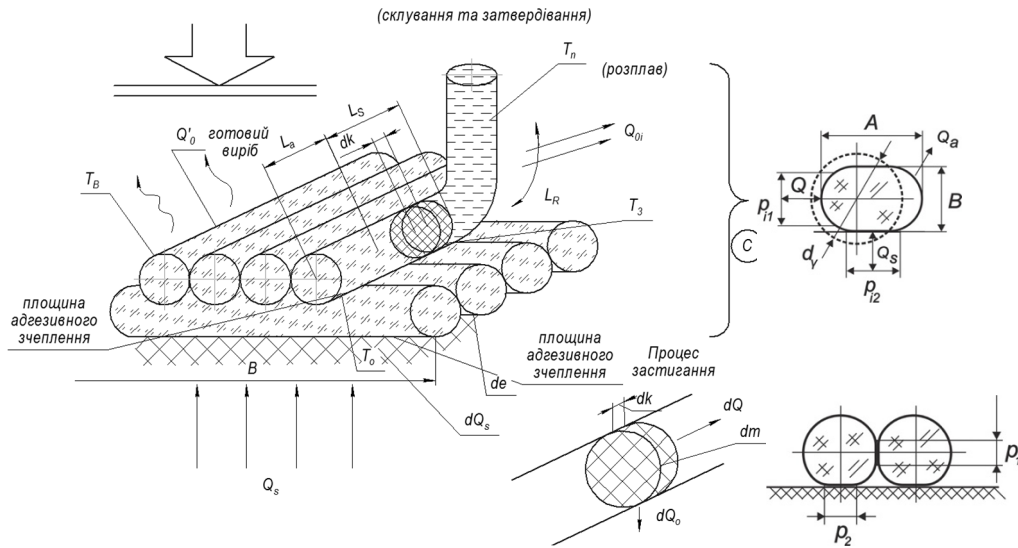


Рис. 1. Викладання філаменту та утворення смуг адгезії

Температура в нитці визначається умовами теплового балансу, який може бути уявлений у вигляді $T=f(Q, x, y, z, \tau)$, $Q = \pm Q_s \pm Q_r - Q_0$. Тут взято до уваги, що знак « \pm » означає зміну напрямку теплового потоку від моменту контакту до моменту повного охолодження нитки на верхньому шарі (рис. 1). Інші позначення наступні: Q_s – теплообмін між робочим столом та шаром філаменту; Q_0 – передача теплоти у навколишнє середовище; Q_r – теплообмін між витками філаменту.

Реологічне рівняння для розплаву філаменту (полімерної нитки) встановлювали за [9]

так: $\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1-273}} \dot{\gamma}^n$, де β – температурний коефіцієнт, K – коефіцієнт консистенції (ефективної в'язкості), τ – дотичні напруження. Крива плинності для розплаву полімеру $\tau = K \dot{\gamma}^n$ n – показник степеня, який характеризує ступінь неньютонівської поведінки розплаву і є індексом течії. Коефіцієнт K є функцією температури, $K \cdot e^{-\beta}$ тож $\beta = -\frac{T_1}{(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{K_2}{K_1} \right)$.

Реологічні параметри K та n визначені методом найменших квадратів за експериментальними даними відповідно до [2].

Температурні поля під час екструзії виконували, виходячи із [9]. Так, вихідна постановка задачі в інваріантній формі включає кінематичні співвідношення, рівняння теплопровідності: $c_v \theta = \text{div}(k \text{grad} \theta) + Q$, квазістатичної рівноваги: $\text{div} \sigma = 0$, та граничних та початкових умов: $\theta = \theta_0$ при $t=0$; $-kn \cdot \text{grad} \theta = -q + \gamma(\theta - \theta_c)$; $\sigma \cdot n = 0$. Тут θ – температура; σ – тензор напружень; Q – потужність об'ємного джерела тепла; q – заданий потік тепла; c_v та k – коефіцієнти теплоємності та теплопровідності; γ – коефіцієнт тепловіддачі; θ_c – температура навколишнього середовища; θ_0 – початкова температура; n – зовнішня нормаль до поверхні тіла; $\sigma = (\sigma_{ij})$, $i, j = x, y, z$. Плоский напружений стан в площині ОХУ визначатиметься так: $\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$, $u_i = u_i(x, y)$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y)$, $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y)$, $\theta = \theta(x, y)$.

Термомеханічна поведінка матеріалу описується співвідношеннями:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^\theta; \varepsilon^\theta = \alpha(\theta - \theta_0)I; s = 2Ge, \text{tr} \sigma = 3K_v \text{tr}(\varepsilon - \varepsilon^\theta).$$

де ε^e та ε^θ – пружна і тепла складові деформації, s та e – девіатори тензорів напружень і деформацій; G і K_v – модуль зсуву та об'ємний модуль; tr – слід тензора; I – одиничний тензор. Це дозволило для розплаву філаменту (полімерної нитки) оцінити дотичні напруження

встановлені за [10] так: $\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1-273}} \dot{\gamma}^n$ де β – температурний коефіцієнт, K – коефіцієнт консистенції (ефективної в'язкості), τ – дотичні напруження. Крива плинності для розплаву

полімеру $\tau = K\dot{\gamma}^n$ де n – показник степеня, який характеризує ступінь неньютонівської поведінки розплаву і ϵ індексом течії.

$$\text{Коефіцієнт } K \text{ є функцією температури, } K \cdot e^{-\beta} \text{ тож } \beta = -\frac{T_1}{(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right).$$

Моделльні експерименти дозволили встановити умови розподілу температур як на робочому столі, так і в i -тому шарі філаменту (рис. 1,а). Властивості досліджуваного пластику наведені у Таблиці. Порівнюючи температурні поля із теплотиметричним контролем, рис. 2, мали змогу уточнити початкові теплової задачі при русі уздовж осі z .

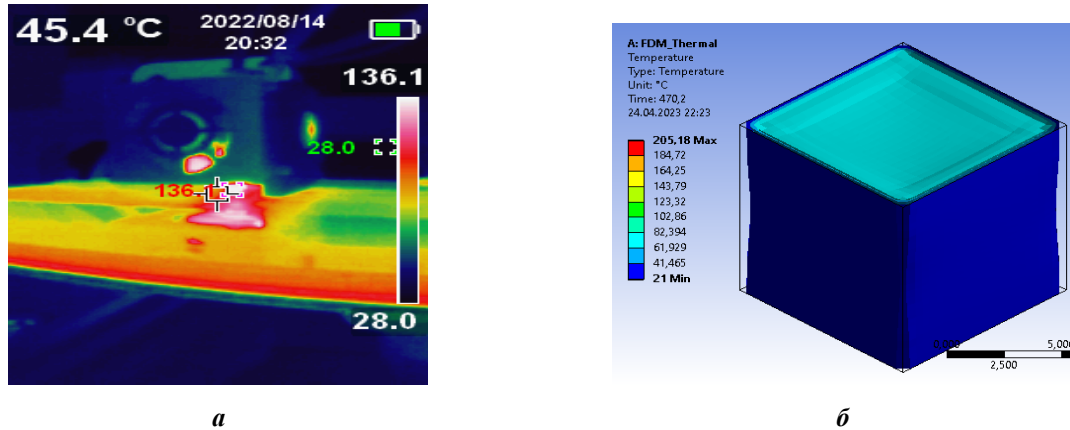


Рис. 2. Визначений тепловізором розподіл температур при друці (а) та ізоповерхня ($T=21$ °C) (б) в момент формування верхнього шару

Таблиця

Характеристики філаментів, що зазначаються виробником

Назва	Міцність на розрив, МПа	Модуль Юнга, МПа	Ударна в'язкість, Дж/м	Термостійкість, °C
	Tensile Strength, Yield (Type 1,0.125", 0.2"/min)	Tensile Modulus (Type 1,0.125", 0.2"/min)	IZOD Impact, notched (Method A,23°C)	Heat Deflection (HDT) @ 264 psi
PC	30-40	1944-1958	28-73	127
PC/ABS	41	1900	196	96
PLA-C	59-63	1680-1960	66-92	55
PA12	28-32	1138-1282	53-135	82*
PA12CF	28,8-63,4	2300-7515	21,4-85	143

Для підвищення точності моделювання і прогнозуванні граничної міцності виробу було оцінено критичні значення напружень руйнування тестових зразків (оцінку виконували при розтягуванні зразка-лопатки), та встановлено їх кореляційний зв'язок із температурами у зоні викладання пластику (на поверхні столу T_c та температури T_e , контрольованої електронними засобами принтеру), рис. 3.

Статистична обробка результатів експерименту показала, що межа міцності для матеріалу PLA_C та для PLA задовільно може бути описана поліноміальними рівняннями другого порядку, із чітко вираженим екстремумом у точці максимальної міцності (для PLA_C $[\sigma]^{PLA_C} = 47,3$ МПа, для PLA $[\sigma]^{PLA} = 35,1$ МПа).

Оскільки поле розсіювання значень для PLA_C є більшим (результати випробувань мають дисперсію до 1,54 МПа), точність регресійної моделі становить 71%, що можна пояснити дією випадкових чинників, обумовлених наявністю у структурі філаменту рубленого вуглецевого волокна:

$$[\sigma]^{PLA_C} = -944,076 + 9,37475 \cdot T_e - 0,0221835 \cdot T_e^2 \quad (1)$$

Для пластику PLA за умови адекватності моделі 86% та дисперсії 0,61 МПа відповідне регресійне рівняння набуде вигляду

$$[\sigma]^{PLA} = -915,472 + 8,81884 \cdot T_e - 0,0204967 \cdot T_e^2 \quad (2)$$

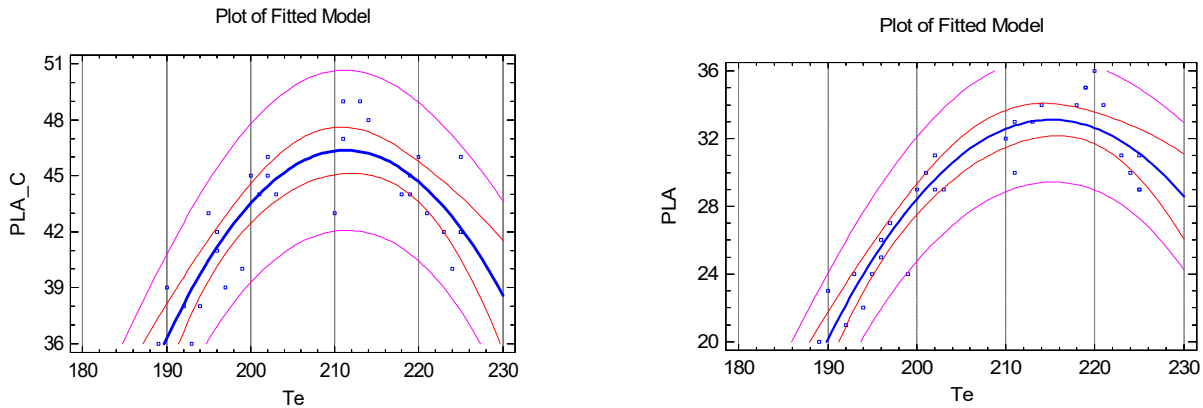


Рис. 3. Зміна межі обчисленої міцності $[\sigma]$, МПа, виробів із PLA_C та PLA у функції температури екструдера T_e

Отримані залежності дозволили уточнити характеристики матеріалу в розрахункових моделях, а також врахувати прояв дефектів усіх трьох груп. Уточнення температур T_0 на основі T_e (рис. 4) дозволило більш точно визначити умови застигання пластиків та формування площинок адгезійного зчеплення відповідно до рис. 1,в. Для робочого діапазону температур $T_e \in [195 \dots 230]$ °C така залежність задовільно описується лінійним виразом.

Таким чином, можна вважати, що одним із механізмів пошкодження матеріалу є розкриття порожнин під дією зовнішніх факторів (наприклад, термобаричного навантаження та ін.), а температура екструзії T_e вносить суттєвий вплив у формування початкових дефектів, які згодом призводять до втрати фізико-механічних характеристик виробу. Саме тривалий опір руйнуванню є одним із проблемних чинників, що перешкоджають інженерному застосуванню адитивних процесів.

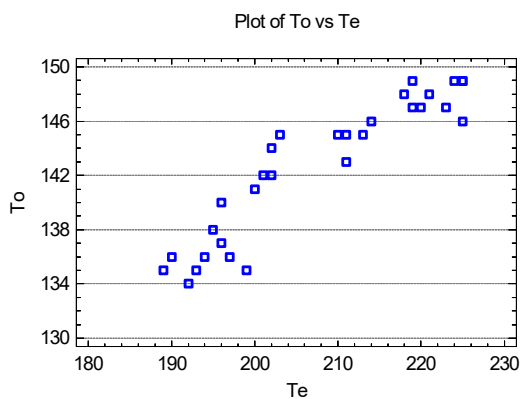


Рис. 4. Зміна температури у позасопловому просторі T_0 при зміні температури екструзії T_e

Саме температура філаменту T_0 у момент викладки на робочому столі визначає майбутні характеристики виробу, і саме ця температура є недостатньо регульованою при 3-D друці. Відповідний висновок був зроблений на основі мікроскопічного дослідження зон активного розвитку дефектів. Останній довів, що при дії робочого навантаження відбувається активне руйнування зразка, з утворенням зон наскрізного розкриття початкового дефекту, найменш стійкого до дії розтяжних напружень.

Було встановлено, що швидкість зростання робочого навантаження безпосередньо визначає кількість ймовірних місць пошкодження. Так, при повільному зростанні напружень від σ_m до σ_{max} , відбувається порушення адгезійного контакту, і кількість виникаючих тріщин є більшою, ніж за умови, коли робоче навантаження зростало різко. Загалом, етапність руйнування виробу у вигляді тонкостінного циліндричного баку наступна:

ружень від σ_m до σ_{max} , відбувається порушення адгезійного контакту, і кількість виникаючих тріщин є більшою, ніж за умови, коли робоче навантаження зростало різко. Загалом, етапність руйнування виробу у вигляді тонкостінного циліндричного баку наступна:

- зростання початково дефекту в межах певної ділянки;
- падіння опору руйнуванню внаслідок охоплення дефектом сусідніх зон, формування тріщини, переважно на межі міжшарового контакту;
- подовження та формування ділянки високої еластичності;
- виокремлення зон лавиноподібного зростання тріщин та утворення дефектів у вигляді кілець.

Висновки. Проведена робота дозволила встановити обумовленість міцності тонкої пластини при прикладанні розтяжного навантаження умовами екструзії, зокрема, температурами в екструдері T_e та температурою викладання T_0 . Показано, що кількість початкових дефектів, які в подальшому впливатимуть на міцність, щільність та надійність роботи виробу, залежить від температури в момент формування адгезійних шарів. Для контролю цієї температури потрібні спеціальні технічні рішення.

Список літератури

1. L. Momoda. “The future of engineering materials: Multifunction for performance-tailored structures”. Bridge, vol. 34 (2004): 18–21.
2. L. Puig, A. Barton, and N. Rando. A review on large deployable structures for astrophysics missions. Acta Astronautica, vol. 67, no. 1-2, (2010): 12–26.
3. Xu Sheng-jin, Kong Xian-ren, Wang Ben-li, MA Xing-rui, Zhang Xiao- chao. Method of equivalent analysis for statistics and dynamics behavior of orthotropic honeycomb sandwich plates, Acta Materiae Compositae Sinica. 17(3) (2000): 92-95.
4. Meifeng He, Wenbin Hu, A study on composite honeycomb sandwich panel structure, Materials and Design, 29 (2008) 709–713.
5. D. T. Queheillalt, G. Carbajal, G. P. Peterson and H. N. Wadley. "A Multifunctional Heat Pipe Sandwich Panel Structure," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, (2008): 312-326.
6. Experimental and numerical analysis of mechanical characteristics of fused deposition processed honeycomb fabricated from PLA or ULTEM 9085 I Derevianko, B Uspensky, K Avramov, A Salenko, K Maksymenko-Sheiko Journal of Sandwich Structures & Materials 25 (2), 264-283
7. Experimental and Numerical Study on Fatigue of Sandwich Plates with Honeycomb Core Manufactured by Fused Deposition Modelling B Uspensky, I Derevianko, K Avramov, O Polishchuk, A Salenko Applied Composite Materials 29 (5), 2033-2061
8. Using a functional approach in solving problems improve performance waterjet equipment O Salenko, M Khorolska, V Lopata, E Solovuch, V Kulyzhskiy Problems of Tribology 27 (2/104), 94-103
9. Using the functional approach in the development of hybrid processes in engineering: theoretical base O Salenko, SA Klimenko, VM Orel, VY Kholodny, NV Gavrushkevich Mech. Adv. Technol 6 (1), 41-55
10. Нова концепція fdm принтера для друку циліндричних деталей О Саленко, А Костенко, Д Цуркан, А Зінчук, М Загірняк, В Орел, Р Аргат. - Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні...

Influence of the temperature of the extruded filaments on the strength parameters of thin-walled products

O. Salenko, V. Orel, G. Habuzian, A. Kostenko, D. Tsurkan

Abstract. The process of FDM printing is considered from the point of view of ensuring the durability (including long-term) of reproduced parts. The peculiarity of the process is that during the forming of the part, loose structures arise, in which defects of three types are formed (structural defects, process defects, and material defects), which later lead to the formation of cracks capable of disrupting the integrity of the product. Among several factors causing the development of adhesive damage, one of the important ones is the melt temperature factor related to the extruder temperature. A model was created to determine the dependence of the temperature of the filament extruded onto the table on the temperature in the extruder, which was additionally identified by thermometric measurements. The dependences of the tensile strength parameters on the melt temperature were obtained.

Key words: FDM printing, strength, temperature fields