

Саленко О.Ф., д.т.н, професор,¹Орел В.М., к.т.н., наук. співробітник,²Костенко А.О., аспірант кафедри конструювання машин,¹Цуркан Д.О., аспірант кафедри конструювання машин,¹Гаврушкевич А.Ю., к.т.н., доцент кафедри конструювання машин,¹Мельничук П.П., д.т.н., професор,³Мельник О.Л., к.т.н., доцент³*Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут Національного технічного університету**України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»¹**Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ²**Державний університет «Житомирська політехніка»³*

ПОЛІПШЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ FDM ВИРОБІВ, СФОРМОВАНИХ ПОВЕРХНЕВИМИ ПЛІВКАМИ

FDM-вироби, у першу чергу, інженерного призначення, наразі набувають все більшого поширення. Даний метод створення твердотільних об'єктів передбачає використання як легкоплавких матеріалів (полімерних пластиків, що мають певні реологічні властивості у розплавленому стані та характеризуються потрібними умовами застигання, так і композиційних матеріалів, створюваних власне під час екструзії [1].

Традиційно з цією метою використовують спеціальний армувальний у вигляді дискретних волокон (скляних чи вуглецевих); рідше – у вигляді безперервної нитки, що вводиться в екструдер одночасно із подаванням легкоплавкого філаменту. Зазвичай такі матеріали є більш міцними, виявляють більшу анізотропію, однак можуть підвищити механічні властивості виробу в цілому.

Традиційно руйнування матеріалів, що виявляють квазікрихкі властивості, задовільно описується теорією Гріффітса. З цих позицій для композитів застосовується макромеханічний підхід, коли тіло композита уявляється суцільним гомогенним середовищем, що має ізотропні властивості в умовах певних координатних осей. У цьому випадку напружений стан при вершині тріщини, що утворилась під дією зосередженого навантаження, забезпечує розповсюдження тріщини в напрямку мінімального опору руйнуванню. Припускається, що міцність стабільна за всіма напрямками, що дозволяє очікувати відхилення тріщини від початкового напрямку при $K_{II} \neq 0$ (зсуву) на певний кут $\chi = -\chi_c$, співпадаючий з напрямком максимального значення сили збурення P , яка обумовлює розвиток тріщини. Прикладання зовнішнього зусилля, при якому буде спостерігатися активне тріщиноутворення, повинно перевищувати опір розтріскуванню.

Внаслідок недосконалості реальних матеріалів, а для композитів внаслідок наявності внутрішніх дефектів та недосконалостей контакту "матриця-армувальник", повний опір розтріскуванню буде залежати від різних типів тріщин (виникнення зсувних тріщин або тріщин відриву). Саме появи та розкриттю початкових тріщин будуть передувати плівки, нанесені на відповідні поверхні оболонки.

Крихкі тріщини у виробках, створених FDM, можуть розвиватися тільки у межах площини викладання філаменту, а критичне напруження, яке викликає появу і розвиток таких тріщин, має бути меншим за межові напруження, що виникають на площинках міжшарової адгезії. Насправді, саме низька адгезійна здатність є причиною появи дефектів і розшарувань у тілі матеріалу; це досить чітко спостерігається на мікрофотографіях зон руйнування.

Особливість процесу FDM полягає у тому, що оболонковий виріб формується пошарово [159]. Оскільки розподіл температур за перерізом сформованого шару має істотні відмінності при зростанні висоти моделі від основи, залишкові напруження, що виникатимуть, будуть відрізнятися.

У випадку нанесення на поверхню зразків додаткових плівок міркування щодо моделей будуть наступними. Вважаємо, що оболонковий виріб постає шаруватою оболонкою із прошарками з дискретних матеріалів. Дана оболонка в процесі деформування описується обмеженою багатозв'язною поверхнею S , має ізотропні або анізотропні властивості в напрямку осей деформування і описується поверхнею або системою поверхонь (суцільних і дискретних) канонічної форми: $x_3 = S(x_1, x_2, t)$, де x_1, x_2, x_3 – координати заготовки в системі відліку (x_0, x_1, x_2, x_3) ; t – час.

Вважаємо, що поверхня S обмежена системою внутрішніх простих контурів $L_i (i = 1, \dots, n)$ і контуром L_{n+1} , який охоплює внутрішні контури L_i . В оболонці є система m довільно орієнтованих перетинаючихся підкріплюючих елементів обмежених контурами $R_i (i = 1, \dots, m)$. Деформований стан має вигляд: $\varepsilon_j = \varepsilon_j(x_1, x_2)$

При розв'язанні задачі нелінійного пружного, в'язкопружного або в'язкопластичного (узагальнена модель Максвелла зі змінними коефіцієнтами в'язкості) деформування серединна поверхня оболонки зв'язана з просторовою лагранжевою сіткою $X^1 X^2$. Тоді при використанні "вузлової схеми", всі шукані величини визначаються в вузлових точках розрахункової сітки.

При моделюванні процесу нелінійного пружного деформування оболонки, що представляє собою в процесі деформування обмежену багатозв'язну поверхню, поверхня розглядається як суцільна полого. В суцільній оболонці, що представляє обмежену однозв'язну область, в якій вздовж контурів, відповідних підкріплюючим елементам (наприклад, стільникам), зосереджені внутрішні джерела або стоки напружень, що зумовлюють стрибки переміщень і кутів повороту. Компоненти деформацій, виникнення яких обумовлено цими джерелами та стоками напружень, виражаються через зосереджені на контурах функціонали, щільності яких є комбінаціями

зазначених стрибків переміщень та кутів повороту, і які входять в узагальнені диференційні рівняння. В результаті інтегрального представлення розв'язання цих рівнянь при задоволенні граничних умов на берегах контурів підкріплюючої оболонки, задача приводиться до системи сингулярних інтегральних рівнянь для визначення шуканих щільностей. Вирішення інтегральних рівнянь у ряді випадків можна побудувати в аналітичній формі у вигляді рядів за ступенями малого параметра. Таке можливо, коли місцеві підкріплюючі елементи мають простий контур (прямокутник, шестикутник, коло, еліпс тощо).

Для визначення навантажень, що діють на вузли сітки та елементи, запишемо рівняння руху в проєкціях, використовуючи для стислості та зручності тензорну форму запису:

$$\nabla_{\beta} H_{mn}^{\beta\alpha} - Q_{mn}^{\beta} B_{\beta mn}^{\beta} + F_{mn}^{\alpha} + Z_{mn}^{\alpha} + I_{mn}^{\alpha} = 0, \quad H_{mn}^{\beta\alpha} B_{\alpha\beta}^{mn} + \nabla_{\beta} Q_{\beta}^{mn} + F_{mn}^3 + Z_{mn}^3 + I_{mn}^3 = 0$$

де $H_{mn}^{\beta\alpha}$ – мембранні сили; Q_{mn}^{β} – перерізуючі сили; $B_{\beta mn}^{\beta}$ – тензор кривизни; ∇_{β} – знак коваріантного диференціювання; F_{mn}^{α} – силовий вплив, прикладений до оболонки; Z_{mn}^{α} – зусилля міжшарового тертя; I_{mn}^{α} – зусилля, що діє на заготовку зі сторони підкріплюючих елементів, фланців.

Доповнимо останні вирази рівняннями моментів та фізичним законом:

$$\omega(\sigma_{\alpha\beta}^{mn}, \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn}, \dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{mn}) = 0 \quad \nabla_{\beta} I_{mn}^{\alpha\beta} - Q_{mn}^{\alpha} = 0$$

Тиск F_{mn}^j віднесено до одиниці площі поверхні оболонки та діє у напрямку нормалі N_{mn}^j . Обмеження випадком крайового навантаження (розрахунковий випадок формування елементів рельєфу, модель жорсткого защемлення) передбачає, що вздовж деякої граничної кривої діє вектор сили, віднесений до одиниці довжини недеформованої серединної поверхні.

Положення кожного вузла серединної поверхні заготовки визначається за діаграмою "зусилля-переміщення". Базисні вектори (коваріантного базису) визначаються в кожному вузлі розрахункової сітки. Компоненти тензора деформації визначаються через прирощення метричного тензора кривизни. При цьому природним для досліджуваного класу деталей є припущення про те, що оболонка є тонкою.

Обчислення деформацій оболонки проводиться з урахуванням багат шарової моделі з підшарами. Як показали дослідження [2,3], найбільш оптимальним є вибір чотирьох шарів за товщиною оболонки. Передбачається, кожен шар оболонки складається з чотирьох підшарів рівної товщини, де сконцентрований матеріал і які працюють в умовах плоского напруженого стану. Ці шари розташовані на рівній відстані один від одного і розділені матеріалом, який не може працювати в умовах плоского напруженого стану в площині, дотичній до оболонки, але який має нескінченно велику жорсткість на зсув у поперечному напрямку.

Напруження та їх прирощення в розглядуваній задачі визначаються за прирощеннями деформацій у кожному вузлі та шарі досліджуваної оболонки. Розкладемо прирощення тензора деформацій на нелінійно пружну, в'язку та пластичну компоненти:

$$\Delta \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn} = \Delta \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,Y} + \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,\Pi} + \varepsilon_{\alpha\beta}^{mn,V}$$

Пружні компоненти тензора прирощень деформацій визначаються з механічного рівняння стану, зі змінним модулем зсуву. При цьому залежність між девіаторами напружень та деформацій має нелінійний характер. Механічний процес руйнування композиту розбитий на стадію розсіяних руйнувань (зародження та розвитку системи мікротріщин) та стадію розвитку магістральних тріщин з наступною біфуркацією. Для опису стадії розвитку магістральної тріщини використано спеціальну теорію локальних руйнувань.

За наявності прошарків з дисперсних матеріалів, що відповідає випадку контакту викладеного філаменту в шарі, прирощення деформацій виражаються наступним чином:

$$\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} = \left(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^p - \left(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^t$$

$$\left(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^p = \Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau} \cdot \sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,e,m}$$

де $\varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$ – компоненти девіатора деформацій; $\sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$ – компоненти девіатора напружень; $\Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau}$ – міра пластичної деформації; k, l – індекси; γ – номер вузла, η – номер шару; τ – момент часу процесу деформування.

Рівняння зв'язку між швидкостями деформацій та напруженнями, а також кінематичні співвідношення та рівняння нерозривності мають вигляд:

$$\sigma_{ik} = \frac{\tau_s}{\sqrt{f_1^2 H^2 + f_2^2 \xi_0}} \left[f_1 \xi_{ik} + \left(f_2 - \frac{1}{3} f_1 \right) \delta_{ik} \xi_0 \right], \quad \xi_{ik} = 0,5(\dot{\varepsilon}_{i,k} + \dot{\varepsilon}_{k,i}) \quad \partial \rho / \partial t + \rho_{,i} \dot{\varepsilon}_i / \rho + \xi_0 = 0$$

де $\sigma_{i,k}$ ξ_{ik} – тензори напружень та швидкостей деформування; $\dot{\varepsilon}_i$ – вектор швидкості; $\xi_0 = \xi_i$ – швидкість об'ємних змін; τ_s – опір деформування матеріалу основи; H – інтенсивність швидкостей деформування; ρ – відносна густина; f_1, f_2 – функції від ρ , що входять в умову пластичності еліпсоїдного типу, зв'язані рівнянням: $T^2 / f_1^2 + \sigma_0^2 / f_2^2 = 1$, де T – інтенсивність дотичних напружень; σ_0 – середнє напруження.

Фізичний закон (реологічне рівняння) прийнято у вигляді

$$T = T(\rho_0, \Lambda, \varepsilon);$$

$$\sigma = \sigma(\rho_0, \Lambda, \varepsilon)$$

Наявність порожнин та дефектів у друкованому виробі та їх вплив на фізико-механічні властивості враховували на основі визначення коефіцієнту інтенсивності напружень для зароджених і нерозвинених тріщин, щільність яких можна установити на основі механічних випробувань зразків. Методика обчислення КІН

отримана із [178], відповідно до якого значення K_I на основі енергетичних методів визначення J -інтеграла становлять:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi l} \frac{1+k-(1-k)\cos 2\beta}{2}; K_{II} = \sigma\sqrt{\pi l} \frac{1-k}{2} \sin 2\beta$$

де $k=1$ за умови плоского напруженого стану; $k=1-\nu^2$ за умови плоскої деформації, $2l$ – ширина тріщини, $2b$ – ширина зразка, кут β – кут між площиною тріщини та еквівалентним навантаженням.

Оскільки філамент перед формуванням виробу проходив етапи розплавлення, екструзії, викладки та застигання, враховано також і явища, що відбувалися перед охолодженням готового виробу. Для розплаву філаменту (полімерної нитки) дотичні напруження τ встановлено за [179] так:

$$\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1-273}} \dot{\gamma}^n$$

Тут 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 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 визначають методом найменших квадратів за експериментальними даними.

Теоретичні дослідження виконували на згенерованих твердотільних моделях. Для розрахунків створено 16 моделей, що мають однаковий внутрішній радіус $R=115$ мм. Товщина стінок оболонок, розмір комірки стільника, висота стільника та товщина стінки стільника залежить від номеру експерименту. Моделі було виконано в САПІА V5, потім імпортовано в Ansys в форматі *.step.

Моделювання виконували для тестової оболонок у вигляді осесиметричних багат шарових баків (рис. 1). Стінки баку являли собою сполучені шари, викладання яких відбувалося на принтері Creality, а також на циліндричній оправці. Для забезпечення герметичності на внутрішній стінці виконане осадження шару металу, методом гальванопластики, із товщиною шару Me 0,10 мм.

Для експериментальних досліджень використовували виготовлені методами FDM демонстратори. Як зазначалося, герметичність демонстратора забезпечувалася нанесенням на внутрішню поверхню баку плівкового покриття методом гальванопластики. Плівка формувалася з Cu , Zn , що переносився з підкладки на звичайну квадратну пластинку 20x20 мм, надруковану на 3D принтері. Характеристики міцності елементів створюваної системи обирали за результатами досліджень [4].

Нанесення тонкої плівки на внутрішню поверхню підвищує міцність виробу, з незначним зростанням його маси. Проведення серії дослідів дозволило опрацювати отриманий статистичний матеріал та побудувати відповідні діаграми Парето (рис. 2) та впливу прийнятих до уваги факторів, серед яких один був якісним (марка Me , що осаджувався – параметр X_2). Функція відгуку залишена тією ж – еквівалентні напруження s_{ei} .

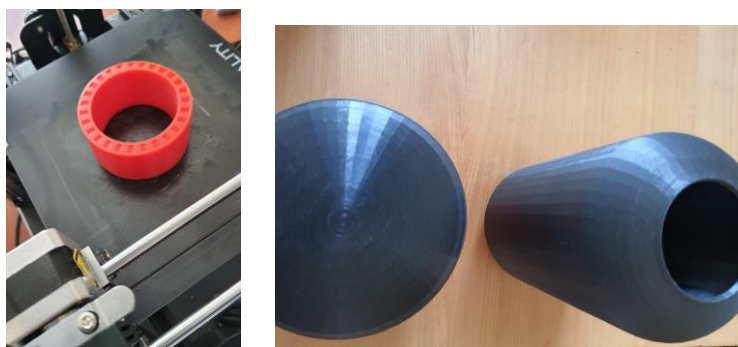
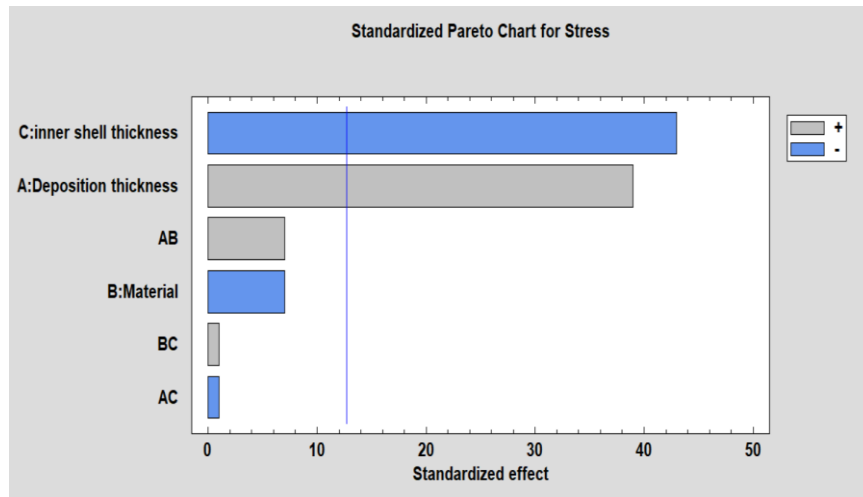


Рис. 1. Друкування зразків для механічних випробувань та тестові зразки

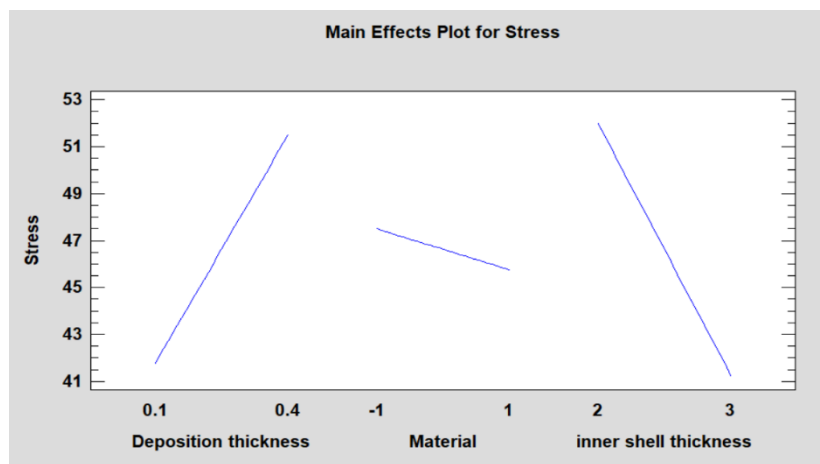
З отриманих діаграм стає очевидно, що товщина стінки стільника та товщина плівки мають практично однаковий по силі вплив, однак різнонаправлену дію. Це відповідає умовам перерозподілу напружень за рахунок формування додаткового шару матеріалу.

Для факторів h_1 та t отримано регресійні рівняння, що пов'язують ці чинники із міцністю s_{ei} :

$$s_{ei} = 64,33 + 36,67h_1 - 2,95833Me - 10,34t + 5,82(Me)h_1 - 1,67h_1t + 0,25(Me)t$$



a)



б)

Рис. 2. Діаграма Парето (а) та головні ефекти впливу (б) для прийнятих до уваги факторів

Незважаючи на обмеженість застосування отриманої залежності, за результатами проведеного повно факторного експерименту із визначенням напружень s_{ei} з наведених результатів можна зробити висновок, що напруження в досліджуваній моделі без покриття вищі в середньому на 30 % порівняно із тими, що виникають в оболонках із нанесеним покриттям; при навантаженні оболонки тиском p_b у 5 МПа максимальні напруження становили близько 80 МПа на внутрішній стінці сфери, у той час як плівка товщиною 0,3 мм спроможна знизити ці напруження до рівня 39...40 МПа.

Отже, з точки зору підвищення тріщиностійкості позитивним рішенням є нанесення плівки покриття на внутрішню поверхню баку. У цьому випадку при наявності плівки $d=0,1$ мм вдається досягти $K_{Ic}=0,86$ та $K_{IIc}=0,86$, що значно перевищує значення оболонок без відповідних покриттів.

Іншим результатом досліджень є висновок щодо важливості наступної фізико-механічної характеристики – тріщиностійкості виробів, яка характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) і відрізняється у початкового філаменту та у готового виробу. Значенні КІН залежить від наявних дефектів, нещільностей сформованого тіла виробу і визначається як використовуваним матеріалом, так і режимами друку.

Література:

1. Fateri M. Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications / M. Fateri, A. Kaouk, A. Cowley, S. Siarov, M.V. Palou, F.G. González, R. Marchant, S. Cristoforetti, M. Sperl. // Additive Manufacturing. – 2018, Vol. 24, pp. 400–404. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.020.
2. Ahuja Vineet. Computational analyses of pressurization in cryogenic tanks / Vineet Ahuja, Ashvin Hosangadi, Stephen Mattick, Chun P. Lee, Robert E. Field, and Harry Ryan. // 44 AIAA Joint Propulsion Conference, July 2008.
3. Wink J. Test campaign on a 10kn class orbital-based hybrid rocket motor for the stratos ii sounding rocket / J. Wink, A. Cervone, T. Knop, R. Huijsman, S. Powell, K. Samarawickrama, A. Fraters, R. Werner, C. Becker. // AIAA 2014 Space Propulsion Conference and Exhibition – 2014. – p. 1–9.
4. Caulfield B. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process / B. Caulfield, P. E. McHugh, and S. Lohfeld. // Journal of Materials Processing Technology – 2007. – Vol. 182, №. 1–3. – p. 477–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007>.