УДК 621.791:531:62-4 DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.08.06

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D ДРУКУ

І.К. Сенченков[1], М.В. Юрженко[2], О.П. Червінко[1], О.П. Масючок[2], М.Г. Кораб[2]

[1]Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. 02000, м. Київ, вул. П. Нестерова, 3.
[2]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виготовлення деталей методом 3D друку, зокрема, за технологією FDM (англ. Fusing Deposition Modeling), є перспективним напрямком в багатьох галузях машинобудування, архітектурі, будівництві, медицині, тощо. Ця проблематика породжує три основні напрямки досліджень: технології FDM 3D друку, матеріалознавство і математичне моделювання процесів з метою оцінки функціональних якостей, зокрема, міцності виробів. Дана робота присвячена третьому напрямку: оцінці напружено-деформованого стану виробів, отриманих методом 3D друку за технологією FDM. В роботі розглянуто три стадії розв'язання цієї задачі: 1 – математична постановка задачі, що включає універсальні балансові співвідношення, визначальні рівняння механічної поведінки матеріалу; 2 – методику чисельного розв'язку задачі; 3 – розв'язування конкретних задач з метою виявлення закономірностей термомеханічних процесів і надання рекомендацій щодо технологічних параметрів 3D друку. Бібліогр. 10, рис. 12.

Ключові слова: адитивні технології, FDM 3D друк, математичне моделювання, напружено-деформований стан

Моделювання методом пошарового наплавлення або FDM 3D друк полімерними матеріалами завдяки універсальності, простоті, багатофункціональності і доступності вважається найбільш поширеною технологією 3D друку в світі, на основі якої працюють мільйони 3D принтерів – від найдешевших до промислових систем тривимірного друку [1, 2]. Для створення виробів методом FDM 3D друку використовується полімерний матеріал у вигляді нитки (філамент) з різних термопластичних матеріалів, які поставляються у котушках. Філамент може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3,0 мм в залежності від специфікації принтера [3].

Як і у всіх технологіях 3D друку, першим кроком на шляху до виготовлення фізичного об'єкта є побудова його цифрової 3D моделі [4] в спеціальних програмах (Autodesk 3DsMAX, ZBrush, Maya, Blender, SolidWorks і т. д.), яка в форматі STL передається в програмне забезпечення 3D принтера. Перед запуском процесу друку обираються необхідні налаштування 3D друку (швидкість, температура і т. д.) і модель в програмі-слайсері автоматично розділяється на горизонтальні шари для проведення розрахунку шляхів переміщення екструдера (друкуючої головки) – пристрою, який оснащено механічним приводом для подачі філаменту, нагрівальним елементом для його плавлення і фільєрою, через яку здійснюється безпосередньо екструзія – виштовхування розплавленого полімерного матеріалу на поверхню виробу (рис. 1, *а*).

На цьому ж етапі за необхідності генеруються підтримуючі конструкції при наявності нависаючих елементів в моделі. По завершенню підготовчої частини програмою генерується керуючий

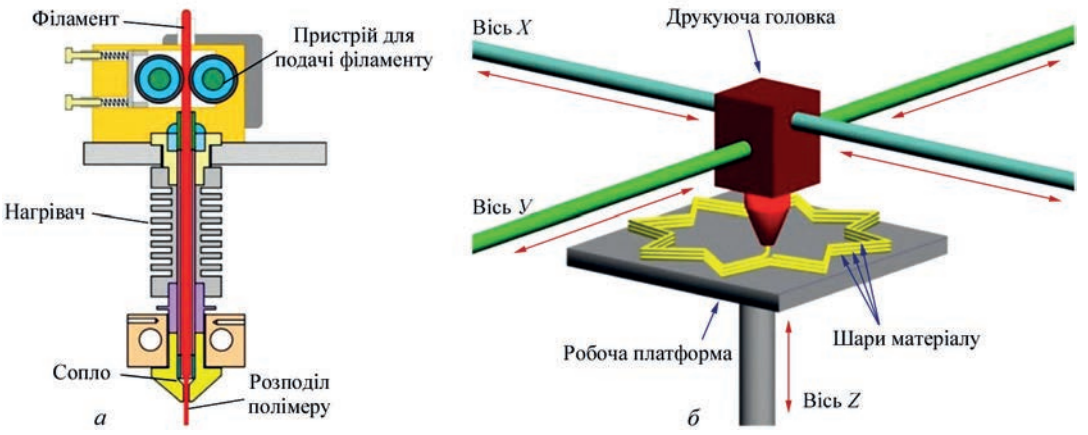

Рис. 1. Схеми екструдера FDM 3D принтера (*а*) і процесу створення ним тривимірної моделі (*б*) [5]

Юрженко М.В. – http://orcid.org/0000-0002-5535-731X, Масючок О.П. – https://orcid.org/0000-0002-3302-3079
Кораб М.Г. – https://orcid.org/0000-0001-8030-1468
© І.К. Сенченков, М.В. Юрженко, О.П. Червінко, О.П. Масючок, М.Г. Кораб, 2021

код (G-code) для 3D принтера на основі цифрових даних і вибраних налаштувань. Надалі філамент з котушки розмотується для введення в екструдер і запускається процес безпосередньо 3D друку: екструдер розплавляє філамент і з високою точністю подає розплав полімерного матеріалу тонкими шарами на робочу поверхню 3D принтера у відповідності до алгоритму друку та цифрової 3D моделі.

Після нанесення шару полімерний матеріал охолоджується і затвердіває, а платформа, на якій формується об'єкт, опускається на величину, рівну товщині шару, що наноситься. Рух в трьох площинах голівки і платформи (рис. 1, *б*) задається алгоритмом, розробленим заздалегідь за допомогою спеціального програмного забезпечення. По завершенню процесу побудови виробу допоміжні конструкції видаляються (вручну або розчиняються в спеціальному розчині), а готовий виріб може бути використано в надрукованому вигляді або піддано будь-якому способу подальшої обробки.

Важливу роль для оцінки міцності деталей відіграє інформація щодо поточних та залишкових напружень, а також дисторсії, особливо для тонкостінних елементів. Тому розробка методів математичного моделювання процесів та оцінки вказаних параметрів є актуальним питанням данної проблематики.

Постановка задачі. В даній роботі використовується спрощена термопружна постановка задачі. Ця модель не враховує ефект релаксації і дає верхню оцінку поточних і залишкових напружень [6]. Більш точна постановка, яка враховує в'язкопружні властивості матеріалу, структурні перетворення (кристалізацію) в матеріалі, а також їх вплив на фізико-механічні властивості матеріалу, буде розглянута в наступних публікаціях.

Балансові рівняння. Нарощування елемента розглядається в прямокутній декартовій системі координат. Матеріал вважається ізотропним. Вихідна постановка задачі в інваріантній формі включає кінематичні співвідношення,

рівняння теплопровідності

$$c_v\dot{\theta} = \mathrm{div}(k\,\mathrm{grad}\,\theta) + Q, \qquad (1.1)$$

квазістатичної рівноваги

$$\mathrm{div}\,\underset{\sim}{\sigma} = 0, \qquad (1.2)$$

граничні і початкові умови

$$\theta = \theta_0 \text{ при } t = 0;\ -k\vec{n}\cdot\mathrm{grad}\,\theta = -q + \gamma(\theta - \theta_C);$$

$$\underset{\sim}{\sigma}\cdot\vec{n} = 0, \qquad (1.3)$$

де θ – температура; σ – тензор напружень; Q – потужність об'ємного джерела тепла; q – заданий потік тепла; c_v і k – коефіцієнти теплоємності і теплопровідності; γ – коефіцієнт тепловіддачі; θ_c – температура навколишнього середовища; θ_0 – початкова температура; $\vec{n}$ – зовнішня нормаль до поверхні тіла; $\underset{\sim}{\sigma} = (\sigma_{ij})$. $i, j = x, y, z$; $i, j = x, y, z$.

Надалі ці рівняння будуть модифіковані з урахуванням процесу нарощування.

Для плоского напруженого в площині *Oxy* стану маємо

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0,\ u_i = u_i(x,y),\ \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x,y),\ \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x,y),\ \theta = \theta(x,y).$$

Термомеханічна поведінка матеріалу описується за допомогою співвідношень

$$\underset{\sim}{\varepsilon} = \underset{\sim}{\varepsilon}^e + \underset{\sim}{\varepsilon}^\theta;\quad \underset{\sim}{\varepsilon}^\theta = \alpha(\theta - \theta_0)\underset{\sim}{I}; \qquad (1.4)$$

$$\underset{\sim}{s} = 2G\underset{\sim}{e},\quad tr\underset{\sim}{\sigma} = 3K_v tr(\underset{\sim}{\varepsilon} - \underset{\sim}{\varepsilon}^\theta); \qquad (1.5)$$

тут $\underset{\sim}{\varepsilon}^e$ і $\underset{\sim}{\varepsilon}^\theta$ – пружна і теплова складові деформації; s і $\underset{\sim}{e}$ девіатори тензорів напружень и деформацій; G і K_v – зсувний та об'ємний модулі; tr – слід тензора; $\underset{\sim}{I}$ – одиничний тензор.

Модель тіл, що ростуть. Розглянемо модифікацію співвідношень (1.4), (1.5) з урахуванням процесу нарощування [7–9]. Припустимо, що задача розв'язується методом скінченних елементів. Нехай процес нарощування є контрольованим, тобто відомі швидкість нарощування і кінцева конфігурація тіла. Найпростіший варіант алгоритму розв'язання полягає в наступному. Конфігурація тіла, що нарощується, покривається фіксованою СЕ-сіткою. СЕ-сітка покриває як саме тіло, що нарощуватиметься, у вихідній конфігурації, так і всі нарощувані в майбутньому шари. Таким чином, сітка (кількість вузлів) не змінюється в процесі чисельного моделювання. Інший підхід полягає в тому, що сітка збільшується внаслідок приєднання елементів, що нарощуються. В області, яка зайнята вихідним тілом, властивості визначаються матеріалом тіла. Елементам, що нарощуються, спочатку приписуються властивості матеріалу «порожнечі», який вважається термопружним з характеристиками

$$E \approx 0,\ \nu \approx 0,\ \alpha = \alpha_f,$$

де E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; α_f – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу нарощування. Теплофізичні властивості «порожнечі» приймаються такими ж, як у матеріалу, який нарощується. Отже, елемент «порожній» тільки з точки зору механіки. У процесі заповнення, який розглядається як процес, що розвивається в часі, «порожні» елементи СЕ-сітки будуть заповнюватися нарощуваним матеріалом. Важливо мати на увазі, що в процесі заповнення елементів (нарощування) деформується вся СЕ-сітка, що покриває як вихідне тіло, так і прилеглі до тіла «порожні» елементи.

Нехай в момент заповнення t^* деякий порожній елемент $\Delta V(t^*)$ сітки має деформацію ε_{ij}^*, і нехай він заповнюється матеріалом, що має температуру θ^*. Передбачається, що матеріал нарощуваних елементів аж до контакту з поверхнею тіла є ненапруженим:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0 \text{ при } t = t^*. \qquad (1.6)$$

В рамках даної моделі нарощування є заповнення елемента, що має попередню деформацію ε_{ij}^*,

матеріалом нарощування з температурою θ^*. Таким чином, умови (1.6), по суті, означають, що

$$\sigma_{ij}(\varepsilon^*_{kl}, \theta^*) = 0 \text{ в } \Delta V(t^*). \quad (1.7)$$

Для того, щоб визначальні рівняння нарощуваного матеріалу (1.5) узгоджувалися з умовою (1.7), необхідно і достатньо модифікувати рівняння (1.5) наступним чином:

$$\underset{\sim}{s} = 2G_f(\underset{\sim}{e} - \underset{\sim}{e}^*), tr\underset{\sim}{\sigma} = 3K_f tr(\underset{\sim}{\varepsilon} - \underset{\sim}{\varepsilon}^* - \alpha_f(\theta - \theta^*)\underset{\sim}{I}). \quad (1.8)$$

Тут нижній індекс *f* показує, що параметри відносяться до матеріалу нарощуваного об'єму. Таким чином, щоб задовольнити умову нарощування (1.6), всі елементи, які нарощуються, повинні мати визначальні рівняння, індивідуалізовані тими конкретними значеннями деформації $\underset{\sim}{\varepsilon}^*$ і температури θ^*, при яких відбувалося їх заповнення. Тому стан $(\varepsilon^*_{ij}, \theta^*)$ для цих елементів можна трактувати як «власний», оскільки він не викликає напружень.

Постановка задачі для тіл, що ростуть. З урахуванням результатів, викладених в попередньому пункті, математична задача включає наступні співвідношення:

– рівняння рівноваги (1.2) і теплопровідності (1.1)

– визначальні рівняння для основного матеріалу

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^e_{ij} + \varepsilon^\theta_{ij}, \quad (1.9)$$

$$s_{ij} = 2Ge_{ij}, \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon^\theta_{kk}), \quad (1.10)$$

– визначальні рівняння для матеріалу, що нарощується, в компонентній формі

$$s_{ij} = 2G\ (e_{ij} - e^*_{ij}), \quad \sigma_{kk} = 3K_f(\varepsilon_{kk} - \varepsilon^{\theta^*}_{kk} - \varepsilon^*_{kk}). \quad (1.11)$$

де *G* і *K* – модулі зсуву та об'ємного стиснення; *Q* – джерело тепла; λ і c_v –коефіцієнти теплопровідності і об'ємної теплоємності

$$\varepsilon^\theta_{ij} = \alpha(\theta - \theta_r)\delta_{ij}, \ \varepsilon^{\theta^*}_{ij} = \alpha(\theta - \theta^*)\delta_{ij}. \quad (1.12)$$

тут θ – поточна температура; θ_r – деяка відлікова температура; α – коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Чисельна методика розв'язування задачі. *Варіаційне формулювання задачі.* Тривимірна задача про термомеханічний стан нарощених деталей розв'язується чисельно за допомогою методу скінченних елементів [9]. Лагранжеве варіаційне формулювання задачі в декартовій системі *Oxyz* координат має вигляд

$$\delta I = \int_F [\lambda\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\ \delta(\frac{\partial\theta}{\partial x}) + \frac{\partial\theta}{\partial y}\ \delta(\frac{\partial\theta}{\partial y}) + \frac{\partial\theta}{\partial z}\ \delta(\frac{\partial\theta}{\partial z})\right) + \left(c_v\dot{\theta} - Q\right)\delta\theta]\ dxdydz + \int_S (-q + \gamma(\theta - \theta_c))\,\delta\theta ds = 0, \quad (2.1)$$

$$\delta\Phi = \int_F (\sigma_{xx}\delta\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\delta\varepsilon_{yy} + \sigma_{zz}\delta\varepsilon_{zz} + 2\sigma_{xy}\varepsilon_{xy} + 2\sigma_{yz}\varepsilon_{yz} + 2\sigma_{zx}\varepsilon_{zx})dxdydz - \int_S \left(t_{nx}\delta u_x + t_{ny}\delta u_y + t_{nz}\delta u_z\right) ds = 0. \quad (2.2)$$

де δI – варіація функціонала для задачі теплопровідності; δΦ – варіація функціонала для завдання механічної рівноваги; t_{nr} і t_{nz} – компоненти вектора напружень на контурі; u_r, u_z – радіальна і осьова компоненти вектора переміщень; *V* і *S* – обєм і поверхня тіла.

Рівняння теплопровідності інтегрується за часом з використанням неявної схеми. При цьому лінеаризація задачі досягається за рахунок того, що залежні від температури характеристики обчислюються для попереднього часового кроку. Розрахований для часу розподіл температури використовується для розв'язання задачі механіки. З умови стаціонарності функціоналу δΦ = 0 (2.2)

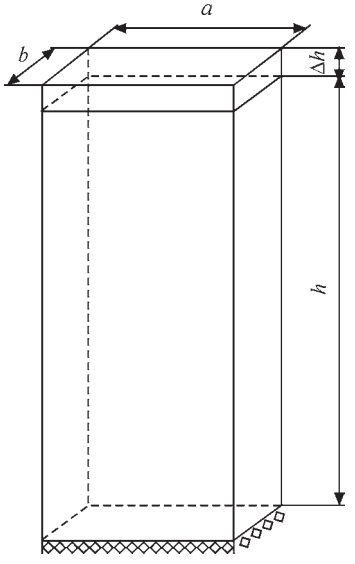

Рис. 2. Нарощуваний елемент

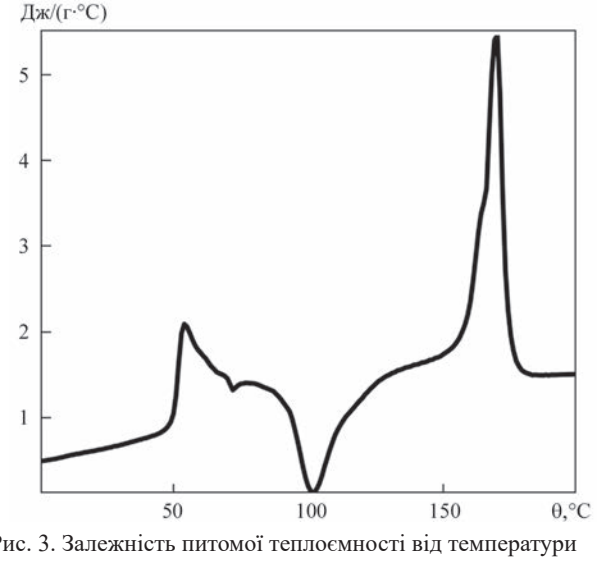

Рис. 3. Залежність питомої теплоємності від температури

отримуємо систему алгебраїчних рівнянь для переміщень у вузлових точках. При цьому температура, що входить у функціонал, приймається постійною по елементу і не варіюється. По знайденим вузловим переміщенням обчислюються деформації та напруження в точках інтегрування, які потім усереднюються по скінченному елементу.

З умови стаціонарності функціоналу $\delta I = 0$ для визначення вузлових значень температури θ_i отримуємо систему лінійних диференційних рівнянь першого порядку за часом. Точність розрахунку залежить від кількості скінченних елементів. Необхідна густина сітки елементів визначається шляхом порівняння розв'язків задачі при різній кількості скінченних елементів.

Об'єкт дослідження. Конфігурація нарощуваного елемента показана на рис. 2.

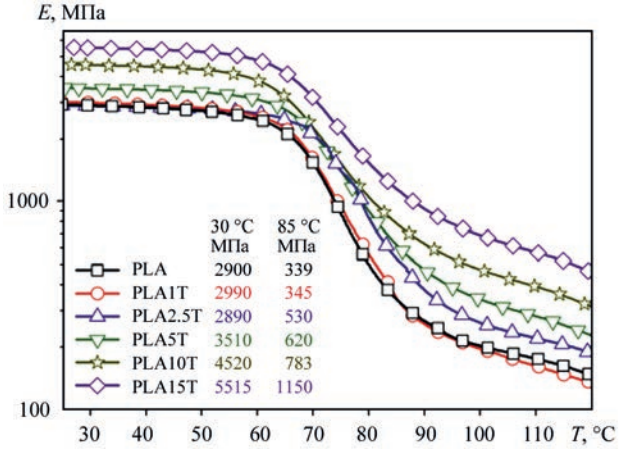

Рис. 4. Залежність модуля пружності Юнга E від температури

Розміри елемента: a = 6 мм, b = 2 мм, h = = 0…50 мм, Δh = 0,14…0,42 мм.

Приймаємо, що один шар Δh = 0,14 мм нарощується за 1,1 с (із розрахунку: швидкість нарощування елемента 0,14 мм × 0,14 мм – 80 мм/с, тобто час нарощування одного шару 0,14 мм на торці – 1,1 с). Далі будемо розглядати три випадки нарощення: шарами 0,14 мм за 1,1с шар, 360 шарів; 0,28 мм за 2,2с шар, 180 шарів; 0,42 мм за 3,2с шар, 120 шарів, тобто швидкість нарощування (збільшення висоти) у цих трьох випадках однакова.

На нижній поверхні задані умови закріплення: $u_y = 0$, $\sigma_{xy} = 0$, $y = 0$.

Термомеханічні властивості матеріалу. Матеріал об'єкта – полімер PLA з температурно залежними властивостями.

Залежність питомої теплоємності від температури показана на рис. 3.

Залежність модуля пружності Юнга від температури, взята з роботи [10], показана на рис. 4. Інші параметри: ρ = 1210 кг/м^3 – щільність, ν = 0,35 – коефіцієнт Пуассона, $\alpha = 41 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$ – коефіцієнт термічного розширення, λ = 0,13 Вт/м^2·К – коефіцієнт теплопровідності. На вільних поверхнях відбувається теплообмін з оточуючим середовищем температури θ_c = 20 °С з коефіцієнтом тепловіддачі γ = 30 Вт/м^2·К.

Під час нарощування температура основи підтримується 50 °С. Нарощування відбувається розплавом матеріалу при 200 °С.

Результати розрахунків. На рис. 5 показана розбивка області на скінченні елементи при Δh =

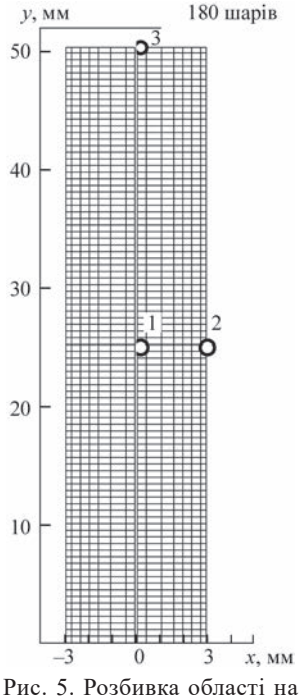

Рис. 5. Розбивка області на скінченні елементи

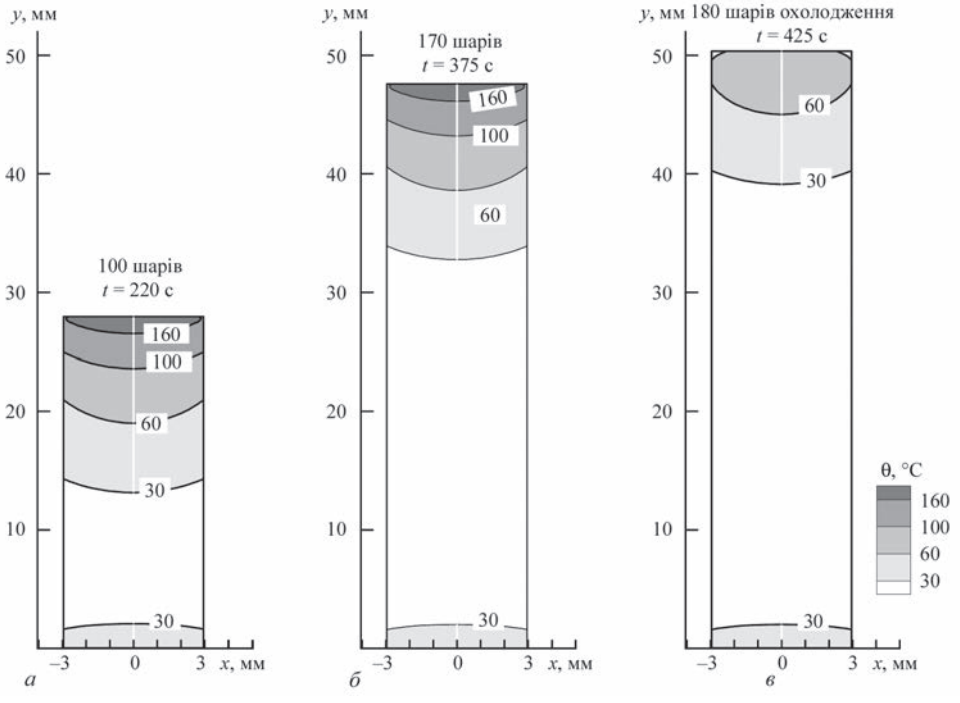

Рис. 6. Ізолінії розподілу температури θ в різні моменти нарощування

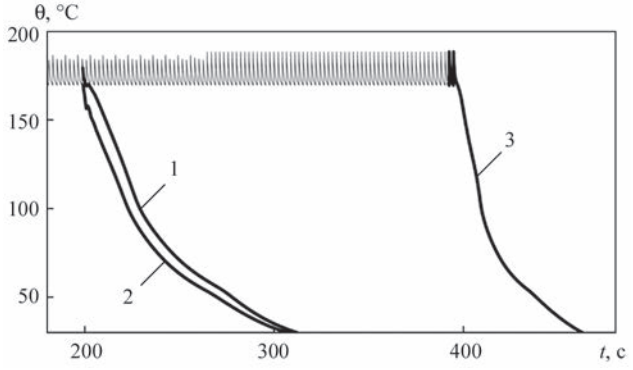

Рис. 7. Зміна температури за часом в точках 1, 2 і 3

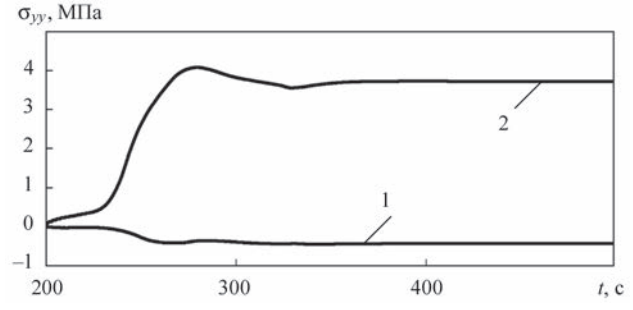

Рис. 8. Змінювання напруження σ_{yy} за часом в точках 1 і 2

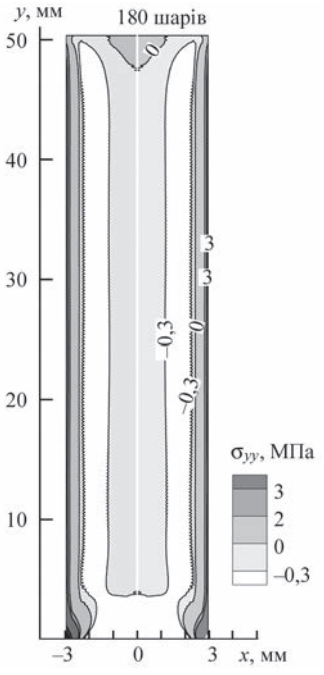

Рис. 9. Залишковий розподіл поздовжнього напруження

= 0,28 мм. Тут показана результуюча розбивка, коли всі шари вже нарощені.

На рис. 6 показані ізолінії розподілу температури в різні моменти нарощування (рис. 6, *а*, *б*) і в момент остигання (рис. 6, *в*).

На рис. 7 показане змінювання за часом температури в точках 1, 2 і 3, показаних на рис. 5. Точки 1 і 2 з'являються в момент нарощення 90-го шару. Точка 3 відповідає вищій точці елемента у різні моменти часу.

На рис. 8 надані аналогічні криві для напруження σ_{yy} в точках 1 і 2.

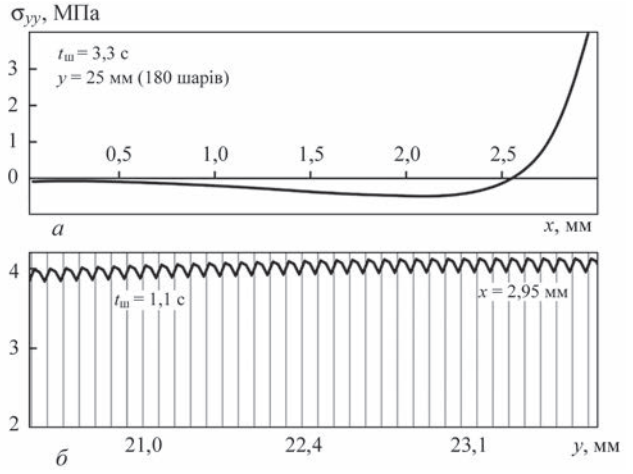

Рис. 10. Нарощування шарами 0,14 мм, 360 шарів: *а* – σ_{yy} в перерізі y = 0,02 м; *б* – в перерізі x = 0, вздовж осі y

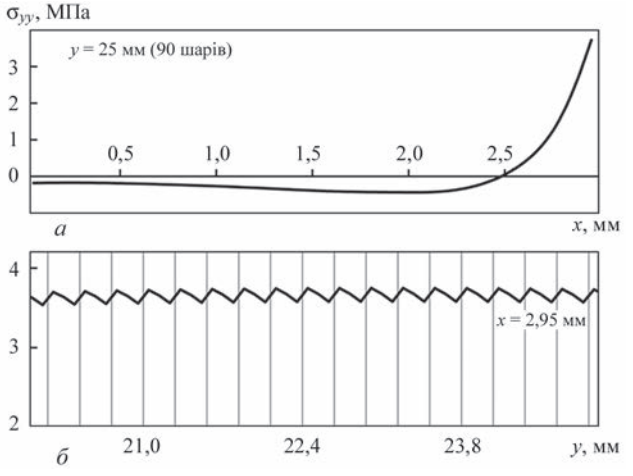

Рис. 11. Нарощування шарами 0,28 мм, t = 2,2 с, 180 шарів: *а* – σ_{yy} в перерізі y = 0,02 м; *б* – в перерізі x = 0, вздовж осі y

Відзначимо, що залишкові напруження в термопружній задачі формуються внаслідок надання розігрітого шару на вже остиглий раніше накладений шар. Класична задача: насадження розігрітої втулки на вал (гарячепресова посадка), коли залишкові напруження обтискнення можуть виникати без пластичних деформацій.

Видно, що залишковий розподіл напружень формується при зміні температури від 80°С до 50°С. Це пов'язане з температурною залежністю модуля Юнга (див. рис. 4). В цьому інтервалі температур відбувається підвищення жорсткості матеріалу.

На рис. 9 надані ізолінії залишкового розподілу σ_{yy} в площині *Oxy*.

Вивчимо вплив товщини нарощуваного шару матеріалу на залишкові напруження. Розглянемо три випадки.

1. Нарощування шарами 0,14 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 10. На рис. 10, б показано зміни σ_{yy} в масштабі шарів.

2. Нарощування шарами 0,28 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 11.

3. Нарощування шарами 0,42 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 12.

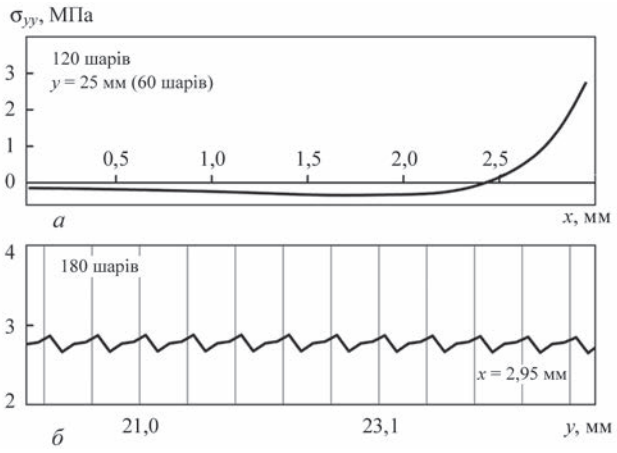

Рис. 12. Нарощування шарами 0,42 мм, t = 3,3 с: *а* – σ_{yy} в перерізі y = 0,02 м; *б* – в перерізі x = 0, вздовж осі y

Видно, що рівень напружень σ_{yy} зменшується зі збільшенням товщини шару нарощування (рис. 10, *а*; 11, *а*; 12, *а*). Чим менше товщина нарощування, тим більше середній рівень напруження, при цьому коливання в границях нарощеного шару відрізняються несуттєво (рис. 10, *б*; 11, *б*; 12, *б*).

Висновки

1. В даній роботі була розвинута термопружна модель напружено-деформованого стану елементів, що виготовляються методом адитивного формування за технологією FDM 3D друку, а саме – розроблено модель багатошарового нарощування тіл, яка базується на теорії тіл, що ростуть, і запропоновано скінченно-елементну методику розрахунку термопружного стану пошарово сформованих об'єктів.

2. Результати проведених досліджень та здійснених розрахунків поточного і залишкового термомеханічного стану конкретного нарощуваного пластинчастого елемента в різні моменти нарощування і в момент охолодження свідчать про те, що залишковий розподіл напружень формується при зміні температури від 80 до 50 °С, що пов'язано з температурною залежністю модуля Юнга досліджуваного матеріалу і підвищенням його жорсткості у вказаному проміжку температур.

3. Оцінка впливу товщини нарощуваного шару матеріалу (0,14; 0,28; 0,42 мм) на залишковий напружений стан елементів показала, що рівень напружень σ_{yy} зменшується зі збільшенням товщини шару нарощування.

Список літератури/References

1. (2016) *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohler's Associates, Inc.
2. Masiuchok, O.P., Yurzhenko, M.V., Kolisnyk, R.V., Korab, M.H. (2020) Adytyvni tekhnolohii polimernykh materialiv (Ohliad). *Avtomatychne zvariuvannia*, **5**, 53–60. DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.05.08
3. Turner, B.N., Strong, R., Gold, S.A. (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20, **3**, 192–204.
4. Wong, K., Hernandez, A. (2012) A Review of Additive Manufacturing, International Scholarly Research Network (ISRN). *Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.5402/2012/208760.
5. *3D-pechat` dlya «chajnikov» ili «chto takoe 3D-printer»?* [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: http://3dtoday.ru/wiki/3dprint_basics/. [in Russian].
6. Sapronov, O.O., Buketov, A.V., Marushchak, P.O. et al. (2019) Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. *Functional materials*., 26(**1**). 114–120. Doi: https://doi.org/10.15407/fm26.01.114.
7. Arutyunyan, N.Kh., Drozdov, A.D., Naumov, V.E`. (1987) *Mekhanika rastushhikh vyazkouprugoplasticheskikh tel.,* Moskow, Nauka.
8. Senchenkov, I.K. (2005) Termomekhanicheskaya model` rastushhikh czilindricheskikh tel iz fizicheski nelinejny`kh materialov. *Prikl. Mekhanika*, 41, **9**, 118–126.
9. Motovilovecz, I.A., Kozlov, I.I., (1987) *Mekhanika svyazanny`kh polej v materialakh i e`lementakh konstrukczij v 5-ti t. T.1. Termouprugost`*. Kiev, Naukova Dumka.
10. Battegazzore, D., Bocchini, S., Frache, A. (2011) Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites. *eXPRESS Polymer Letters*, **5**, 10, 849–858.

NUMERICAL MODELLING OF STRESS-STRAIN STATE OF ELEMENTS MANUFACTURED BY 3D PRINTING

I.K. Senchenkov[1], M.V. Iurzhenko[2], O.P. Chervinko[1], O.P. Masiuchok[2], M.G. Korab[2]

[1]S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of Ukraine, 3 Nesterov Str., 02000, Kyiv, Ukraine
[2]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kyiv.ua

Manufacture of parts by the method of 3D printing, in particular, applying FDM (Fusing Deposition Modeling) technology, is a promising trend in many branches of mechanical engineering, architecture, construction, medicine, etc. This range of problems challenges three main directions of studies: FDM 3D printing technology, materials science and mathematical modeling of processes for evaluation of functional qualities, in particular, strength of products. This work is devoted to the third direction: evaluation of stress-strain state of products manufactured by 3D printing using FDM technology. The paper considers three stages of solving this problem: 1 – mathematical formulation of the problem, which includes universal balance relations, determining equations of mechanical behaviour of the material; 2 – method of numerical solution of the problem; 3 – solving specific problems in order to determine patterns of thermomechanical processes and provide recommendations for technological parameters of 3D printing. 10 Ref., 12 Fig.

Keywords: additive technology, FDM 3D printing, mathematical modeling, stress-strain state

Надійшла до редакції 11.06.2021