

3. Kartashov A.V., Luchentsova N.V. Odnа realizatsiia metoda posledovatel'no-odinochnogo razmeshcheniia dlia resheniia zadachi optimal'nogo razmeshcheniia krugov razlichnykh radiusov v polose [One implementation of the method of sequentially-single placement to solve the problem of optimal placement of circles of different radii in the strip]. *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy – Radio-electronic and computer system*, 2007, no. 2, pp. 90-94. (Rus.)
4. Gil' N.I., Komiak V.M., Opanasiuk A.B. Ob odnom algoritme sostavleniia ratsional'nykh skhem raskroia odnotipnykh listov na mnogosviaznye zagotovki [About one algorithm for drawing up rational schemes for cutting the same type of sheets into multiply connected blanks]. *Teoriya i metody avtomatizirovannogo proektirovaniia – Theory and methods of computer-aided design*, 1985, vol. 2, pp. 123-128. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.08.2019

УДК 621.923

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201063

© Лещенко О.І.¹, Андреев О.О.²

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ, НАДРУКОВАНИХ ЗАСОБАМИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, І ПОРІВНЯННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З ДАНИМИ, ОТРИМАНИМИ ЗА ДОПОМОГОЮ САЕ-СИСТЕМИ

У роботі наведені результати експериментального дослідження зразків на вигин, надрукованих засобами адитивної технології за різними схемами заповнення комірок і побудови каркаса пластин, а також їх базування на столі принтера. Встановлено, що для збільшення міцності при вигині матеріалу надрукованого зразка комірки сітки з більшими властивостями міцності доцільно створювати в тому шарі, який під дією прикладеної сили відчуває розтягнення. Такий висновок відкриває можливість створення 3D-печаткою деталей зі змінними властивостями міцності за певними напрямками. В роботі отримало подальший розвиток наукове обґрунтування причини відмінності параметрів міцності надрукованого матеріалу в залежності від його внутрішньої структури і базування при виготовленні. За підсумками даної роботи можна зробити висновок, що моделювання міцності властивостей об'єктів, зроблених засобами 3D-друку, можливо за допомогою САЕ-систем (англ. Computer Aided Engineering) та бібліотеки коригувальних коефіцієнтів, створеної на підприємстві шляхом аналізу статистичної інформації.

Ключові слова: 3D-друк, адитивна технологія, параметри друку, 3D-принтер, міцність надрукованої деталі, якість друку.

Лещенко А.И., Андреев О.О. Исследование прочности материалов, напечатанных средствами аддитивной технологии и сопоставление их свойств с данными, полученными с помощью САЕ-системы. В работе приведены результаты экспериментального исследования образцов на изгиб, напечатанных средствами аддитивной технологии по различным схемам заполнения ячеек и построения каркаса пластин, а также их базирования на столе принтера. Установлено, что для увеличения прочности при изгибе материала напечатанного образца ячейки сетки с большими прочностными свойствами целесообразно создавать в том слое, кото-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, aleshenko1954@gmail.com

² бакалавр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, educationpstu@gmail.com

рий под действием приложенной силы испытывает растяжение. Такой вывод открывает возможность создания 3D-печатью деталей со сменными прочностными свойствами по определенным направлениям. В работе получило дальнейшее развитие научное обоснование причины различия параметров прочности напечатанного материала в зависимости от его внутренней структуры и базирования при изготовлении. По итогам данной работы можно сделать вывод, что моделирование прочностных свойств объектов, сделанных средствами 3D-печати, возможно с помощью CAE-систем (англ. Computer Aided Engineering) и библиотеки корректирующих коэффициентов, созданной на предприятии путем анализа статистической информации.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивная технология, параметры печати, 3D-принтер, прочность напечатанной детали, качество печати.

O.I. Leshenko, O.O. Andreev. The study of the strength of materials printed using additive technology and comparing their properties with the data obtained using the CAE-system. The paper presents the results of an experimental study of bending tests of the samples printed by means of additive technology according to various schemes for filling cells and constructing a frame of plates, as well as their positioning on the printer table. It has been found that to increase the strength of the printed material during bending, it is advisable to create mesh layers with large strength properties in the layers of the parts that are opposite to the applied force, since it is the lower layer that undergoes stretching, while the upper layer is compressed. This conclusion opens up the possibility of creating 3D-printed samples with variable strength properties in certain directions. Test samples were created with the formation of the borders consisting of 1, 2, 3 and 4 threads. The analysis of the experimental data makes it possible to note that the samples having 3 and 4 threads are similar in their strength characteristics. That suggests that for optimal industrial use it is enough to create structures with 2, 3 threads of the boundary shell. The scientific substantiation of the reason for the difference in the strength parameters of the printed material depending on its internal structure and positioning on the printer table was further developed. Based on the results of this work, we can conclude that modelling the strength properties of objects created by 3D-printing is possible, provided that the enterprise creates a library of the correction factors obtained based on the analysis of statistical information. In Ukraine, additive technologies are not yet the subject of the first choice. Therefore, the development at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Priazovsky State Technical University and the manufacture on a 3D-printer of the «Lubricating» Gear part of a cylindrical gearbox is a pioneering solution in the heavy engineering industry. The obtained Implementation Act is the result of the first stage of promising work, for the continuation of which both production stands and engineering training, which includes the widespread use of CAE-systems, are necessary. It should be noted that even high-level, generally accessible CAE-systems do not yet have separate applications for working with the parts created using additive technology, which creates the need to create user-developed macros for this purpose.

Keywords: 3D-printing, additive technology, printing options, 3D-printer, durability of the printed part, print quality.

Постановка проблеми. Технологія FDM-друку (англ. Fused Deposition Modeling) є складовою частиною адитивної технології і має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок пошарового наплавлення матеріалу, який повторює перетини (slice) цифрової моделі. В Україні останнім часом відзначені тенденції, здатні позитивно вплинути на перспективи розвитку адитивного виробництва. Наприклад, 3D-принтер «Trident» українського виробництва – прекрасна альтернатива закордонним аналогам завдяки досить великим розмірам області побудови, жорсткості конструкції, відмінній комплектації при постачанні і сенсорному екрану.

Особливий інтерес для України представляє малий бізнес (іноді говорять «сімейний бізнес»), розвитку якого так не вистачає нашій країні. Саме бізнес в області адитивних технологій відкриває можливості надавати такі послуги: цифрове моделювання для міні-майстерень по

друку і заміні деталей побутової техніки, makers factory – центри 3D-друку з оплатою машинного часу, наприклад, за аналогією з відділеннями німецької компанії FabGate.

Чільну роль для досягнення необхідних характеристик міцності відіграють фізико-механічні властивості вихідного матеріалу, тобто сировина для друку. В даний час промисловість випускає безліч матеріалів для отримання моделей на 3D-принтерах з докладними фізико-механічними властивостями. Разом з тим, якщо порівняти кінцеві характеристики ABS-пластику для 3D-друку з ливарним ABS, то останній поки ще залишається міцніше надрукованого на принтерах. Тому важко знайти довідкові дані про отримані на 3D-принтерах властивості матеріалів готових деталей. Характеристики міцності вихідного матеріалу можуть значно відрізнятися від властивостей надрукованих виробів, які будуть залежати від безлічі (саме безлічі) умов, включаючи, наприклад, температуру, при якій працював принтер.

Разом з тим замовник бажає отримати виріб з необхідними йому властивостями. Тому актуально накопичувати інформацію з тих чи інших властивостей надрукованих деталей при різних умовах, створюючи спеціальні бібліотеки, але це довготривалий шлях. Все вище перераховане вказує на проблему прогнозування властивостей надрукованого матеріалу та факторів, що впливають на їх зміни по регламентованим параметрам.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Механічна міцність виробів, отриманих з даного матеріалу методом FDM-друку, залежить від цілого ряду параметрів, пов'язаних з конкретною моделлю принтера, або мають більш загальне ставлення до властивостей технології цього типу, наприклад: форма перетину деталі, схема її базування при друку і тип пластика; діаметр сопла екструдера; висота шарів і параметри комірок, які їх заповнюють; коефіцієнт подачі пластика; температура екструдера, температура столу, першого шару і інших шарів; швидкість друку; заповнення матеріалу шарів на 20, 30...100%.

Однак, якщо враховувати, що елементарною складовою FDM-друку є комірка (її форма – чотирьохгранник або шестигранник), то домінуючу роль відіграють її розміри і товщина стінки. Обидва параметра збільшують щільність надрукованого матеріалу та іноді, можливо в силу неоднозначності перекладу, характеризують одним поняттям – «заповнення» формуючих матеріал друку комірок (infill). Встановлено, що чим товще стінка комірки (число ниток) і оболонки виробу, тим вона буде більш міцна і менш гнучка [1]. Аналогічно, чим менші розміри комірки в матеріалі виробу, тим він буде більш міцним і менш гнучким.

Найважливіший параметр друку – швидкість заповнення (мм/с) (залівки) моделі. При друку з високою швидкістю заповнення можна заощадити час, але це негативно позначиться на якості моделі, особливо її шорсткості. Висота шару – важливий параметр, який відповідає за рельєф поверхні друкованої деталі. Шорсткість поверхні буде завжди, але чим тонший шар, тим менша висота мікронерівностей.

Якість поверхні і геометрична точність безпосередньо залежать від орієнтації моделі на робочій платформі принтера. При побудові плоскої деталі, розташувавши її горизонтально, можна отримати низьку шорсткість горизонтальній поверхні. Для отримання кращої якості бічних поверхонь необхідно зменшити товщину шарів, зорієнтувати модель під кутом до площини платформи або призначити додаткову обробку після друку. Друк складних поверхонь, для яких потрібна підтримка (технологічні упори для корпусу моделі), виконується на принтерах з двома соплами. Одне сопло друкує деталь будівельним матеріалом, а друге друкує підтримки, які в подальшому демонтуються механічно або розчиняються.

Розташування деталі на столі принтера впливає на міцність виробу. Наприклад, візьмемо паралелепіпед, коли при друку шари розташовуються уздовж основної площини XY (вісь Z – вертикальна вісь). Якщо друкувати уздовж площини XZ (або YZ) шари розташовуються поперек основної площини. Міцність моделей із зазначеним розташуванням при базуванні буде значно відрізнятися: зламати деталь навантаженням перпендикулярно шару набагато простіше, ніж поперек. Звідси висновок – при друку створена поверхонь методом пошарового наплавлення веде до утворення багаторівневої фізичної структури матеріалу деталі. Внаслідок цього виникає анізотропія властивостей, тобто відмінність механічних властивостей деталі в різних напрямках, що є однією з тем даного дослідження.

Найважливішою властивістю будь-якого матеріалу, в тому числі і матеріалу отриманого методом FDM-друку, є діаграма опору розтягування/стиску, для якої інтервал прямо пропорційної залежності визначає модуль пружності (модуль Юнга) як відношення напруги до дефор-

мації. У загальному випадку ці межі зазначеного інтервалу можуть бути різні і навіть відрізнятися уздовж різних осей прикладання навантаження. Без значення модуля пружності неможливий автоматизований розрахунок міцності за допомогою САЕ-систем.

Міцність на вигин є мірою, яка б показувала наскільки добре матеріал чинить опір вигину або «яка жорсткість матеріалу». При цьому до найбільшого розтягування/стиску схильні крайні нижній і верхній шари щодо доданої сили. Між ними розташований нейтральний шар, довжина якого внаслідок вигину не змінюється. Якщо вважати, що в перетинах виникає тільки згинальний момент (чистий вигин), а поперечні сили відсутні, то таке спрощення може призвести до значних похибок.

Якщо взяти прямокутний брусок перетином $b \times h$ (мм) з упором на циліндричні опори, відстань між якими L (мм), під дією сили F (Н) він прогнеться на величину z (мм). Руйнівне напруження [2] при згині $\sigma_{\text{виг}}$ (МПа) визначається за формулою (1), в якій перший співмножник відповідає деформації чистого вигину, а другий – враховує зсувну деформацію від поперечних сил. Модуль пружності [2] при вигині $E_{\text{виг}}$ (МПа) обчислюють за формулою (2).

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot z^2}{L^2} \right), \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$E_{\text{виг}} = \frac{(F_m - F_n) \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (z_m - z_n)}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

де L – відстань між опорами, мм; h – товщина і b – ширина зразка, мм; F_m та F_n – навантаження щодо відносної деформації 0,3% і 0,1%, відповідно, Н; z_m і z_n – прогини зразка щодо деформації крайніх волокон при 0,3% і 0,1%, відповідно, мм. Відносна деформація крайніх волокон обчислюється за формулою: $\varepsilon = (6 \cdot z \cdot h / L^2) \cdot 100\%$.

Експериментально встановлено [3] залежність межі міцності на розрив виробів з пластика ABS від кількості ниток в оболонці поверхневого шару – 2, 4, ... 10 ниток, при цьому, якщо межа плинності для зразків виявилася практично однаковою, то інтервал плинності істотно різнитися. Разом з тим, в даному дослідженні немає інформації про внутрішню структуру заповнення серединних верств зразків.

Метою роботи є експериментальне дослідження зразків на вигин, надрукованих за різними схемами заповнення комірок і побудови каркаса пластин, а також їх базування на столі принтера; аналіз співвідношення експериментально-розрахункових даних про властивості пластин з даними, отриманими на платформі САЕ-системи 3D-моделей пластин з внутрішньою конструкцією, аналогічною надрукованим зразкам.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що набуло експериментально-розрахункового обґрунтування причини відмінності параметрів міцності надрукованого матеріалу в залежності від його внутрішньої структури і базування при виготовленні.

Виклад основного матеріалу. Деталі, одержувані за FDM-технології, мають набір фізичних характеристик, відмінних від даних вихідного матеріалу, найважливішими з яких є межа міцності на вигин σ_v і модуль пружності E , або як його іноді називають, модуль Юнга.

Проведемо експериментальне дослідження пружних властивостей зразків пластин, отриманих 3D-печаткою з різними товщинами їх внутрішньо-каркасних конструкцій і базуванням на столі принтера. Для випробувань вихідним матеріалом обраний пластик ABS: модуль пружності при вигині – 3,0 ГПа, руйнівне напруження при згині – 52 МПа. Відповідно до стандарту ISO178: 2010 «Пластмас. Метод випробування на статичний вигин» зразок для випробувань вільно прилягає до двох опор і навантажується в середині між опорами. Далі навантаження знімається, а потім знову прикладається. При цьому фіксується величина прогину при дискретному ряді значень навантаження і момент руйнування зразка пластика.

Для двох груп випробувань, назвемо їх умовно А і В (по 4 випробування в кожній групі), були надруковані (принтер «Flyingbear Tornado 2») 8 зразків у формі прямокутних пластин з однаковими габаритними розмірами (рис. 1): довжина $a = 110$ мм, ширина $b = 20$ мм, висота $h = 5$ мм. Перші 4 шари зразків, кожен заввишки 0,25 мм, і останні 4 шари виконуються з 100% заливанням для забезпечення низької шорсткості. Всі шари в середині зразків висотою 0,25 мм обмежені по периметру пластини чотирма нитками пластика товщиною 0,25 мм кожна. Таким чином, для зразків створюється оболонка розмірами $0,25 \times 4 = 1,0$ мм. Разом з тим, серединні шари надруковані за різними схемами базування пластин на столі принтера і товщині (числі

ниток) їх внутрішнього каркаса (граней) комірок з розмірами $3,6 \times 3,6$ мм:

- для випробування А (рис. 1, а): 4 зразка з базуванням по площині 20×110 мм і наплавленням шарами до висоти 5 мм, при висоті шарів 0,25 мм з шириною нитки 0,25 мм і зростаючим числом ниток в граничному шарі комірок $k = 1 \dots 4$ для кожного зразка;

- для випробування В (рис. 1, б): 4 зразка з базуванням по площині 5×110 мм і наплавленням шарами до висоти 20 мм, при висоті шарів 0,25 мм з шириною нитки 0,25 мм і зростаючим числом ниток в граничному шарі комірок $k = 1 \dots 4$ для кожного зразка.

Таким чином серединних верств зразків з оригінальною конструкцією буде: для А – 12, для В – 72.

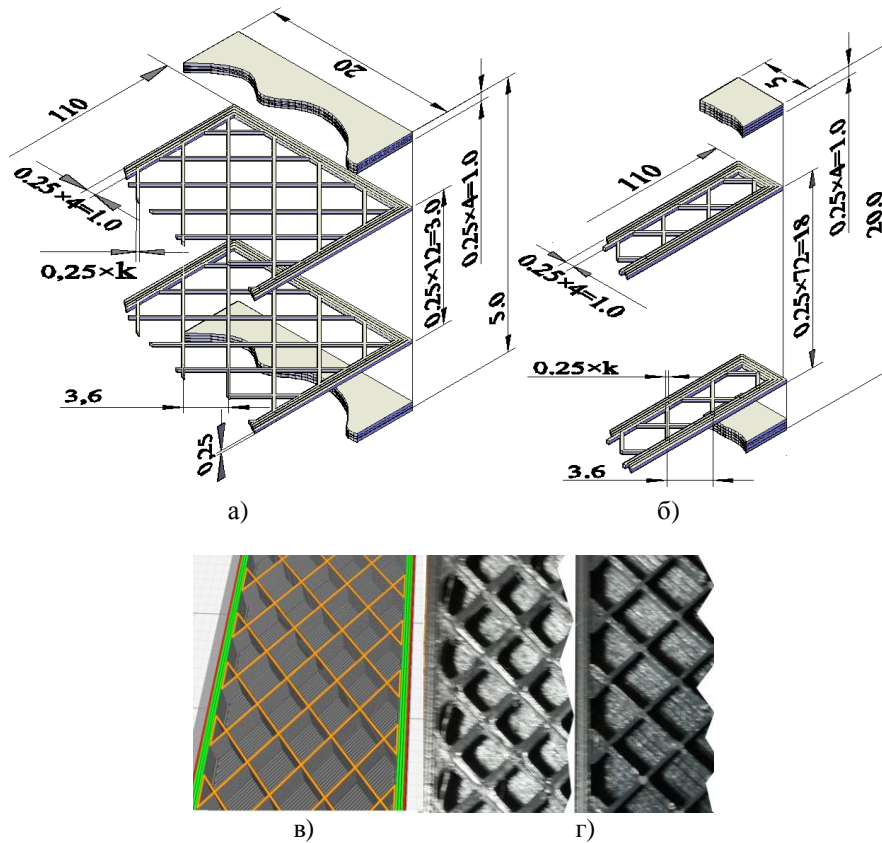


Рис. 1 – Моделі зразків А і В (k – число ниток, вихідні розміри комірок $3,6 \times 3,6$ мм) для випробувань на вигин з базуванням: а – по площині 20×120 мм до висоти 5 мм; б – по площині 5×120 мм до висоти 20 мм; в – формування G-кодів (програма Cura 3D) управління 3D-принтером для зразків дослідів А та В; г – каркаси комірок заготовок з різною товщиною граней (числом ниток)

Інші параметри друку однакові для всіх зразків: структура заповнення шарів – чотирьох-гранники; діаметр сопла екструдера – 0,3 мм; коефіцієнт подачі пластика – 0,97; температура екструдера – 250°C ; температура столу першого шару – 115°C ; температура столу і інших шарів – 105°C ; швидкість друку 60 мм/с. Випробування на статичний вигин проводилися за трьох-точковою схемою [2, 3], при якій аналізується викривлення зразка під дією зовнішньої сили. Для отримання експериментальних даних з метою обчислення напружень σ від прикладених сил F (Н) за формулою (1) (в тому числі і межі міцності на вигин σ_b) і модуля пружності E за формулою (2) був зібраний стенд (рис. 2), в якому зразок 1 контактує з циліндричними опорами 2, встановленими на базовій відстані $L = 90$ мм.

Шляхом обертання обійми талрепа 3 надається розтяжне зусилля динамометру 4 (модель Х-220, ціна поділки 0,01 кг) з приростом $\Delta F = 1\text{кг} = 10\text{ Н}$ і через нього випробуваному зразку 1. Прогин зразка z (мм) фіксувався за допомогою індикатора (ГОСТ 755-88) годинного типу 5 з ціною поділки 0,01 мм.



Рис. 2 – Випробування надрукованих зразків на вигин: 1 – зразок; 2 – опорний валик (базова довжина опори для зразка $L = 90$ мм); 3 – талреп; 4 – динамометр; 5 – індикатор

Всі зразки для випробувань встановлювалися так, щоб напрямок прикладання сили F був перпендикулярний більшій грані зразка 20×110 мм. Результати випробувань були записані як середнє трьох вимірів в таблиці, в яких дискретно змінюється зусилля $\Delta F = 10$ Н та зафіксований індикатором прогин z (мм) зразків з числом ниток $k = 1 \dots 4$ і з базуванням при його друку по площині (дослід А) 20×110 мм (рис. 1, а) або по площині (дослід В) 5×110 мм (рис. 1, б). За даними таблиць побудовано графіки зміни деформації вигину зразків z від прикладених зусиль для дослідів А і дослідів В (рис. 3). Номери графіків відповідають числу ниток, що формують грані комірки: графік 1 – комірку і стінку зразка формує одна нитка, графіки 2, 3 і 4 – дві, три і чотири нитки, відповідно. Отримані експериментальні дані величин прогинів від прикладених сил $Z = z(F)$ і графіки їх змін дозволяють розрахувати за формулою (1) межу плинності σ_T і межу міцності на вигин $\sigma_{виг}$, а також модуль пружності E за формулою (2). Для дослідів А та В дані розрахунково-графічного аналізу експериментальних значень записуємо в таблицю.

При обчислювальних операціях з експериментальними даними враховувалися такі припущення. З рівняння (1) видно, що внесок зсувних деформацій в величину $\sigma_{виг}$ збільшується пропорційно збільшенню відношення (z/L) прогину z до базової довжини L . Отже, при малих прогинах зсувні деформації практично не будуть впливати на величину $\sigma_{виг}$. Це означає, що в цьому випадку для будь-якого зразка даного перетину і розмірів виникають напруги, які залежатимуть тільки від прикладеної сили.

Випробування на вигин є найбільш значущим для оцінки якості виробів. Разом з тим різниця між розрахунковими і експериментальними значеннями модуля пружності E при розтягуванні значно менша, ніж при згині [4].

Розрахунковий модуль пружності (2) при вигині трохи нижчий розрахункового модуля пружності. Така відмінність ще пов'язана з тим, що прикладення зусилля F , щоб домогтися відносної деформації ε приблизно 0,1%, 0,3%, вельми проблематично. Тому розрахунки модуля пружності E завжди проводяться при коливанні відносної деформації ε в певних межах [2].

Засобами 3D-графіки побудовано моделі пластин з відтворенням їх ґратчастої структури і різною товщиною граней комірок. Командами графічного пакета отримані обсяги моделей. Після зважування їх фізичних аналогів були отримані питомі ваги d (г/см³) для всіх зразків.

Аналіз експериментальних даних дозволяє підвести деякі підсумки. Матеріал, що отримується FDM-печаткою (менш міцний, ніж сировина з якого він зроблений), може мати різну структуру, але вона обов'язково буде складатися з сукупності комірок, межі яких визначають укладене число ниток [5]. Для того, щоб оцінити міцність надрукованого матеріалу та анізотропію його властивостей, необхідно моделювати силовий вплив уздовж і поперек напрямку укладання ниток. В обох випадках дослідів А та В докладається зусилля до площини 20×110 мм, але отримується різний результат по прогину. Це відбувається тому, що в ході експериментів прикладена сила діє в одному випадку в напрямку, перпендикулярному бічній грані внутрішньої комірки зразка, а в іншому – в напрямку площині шару, в якому лежить комірка.

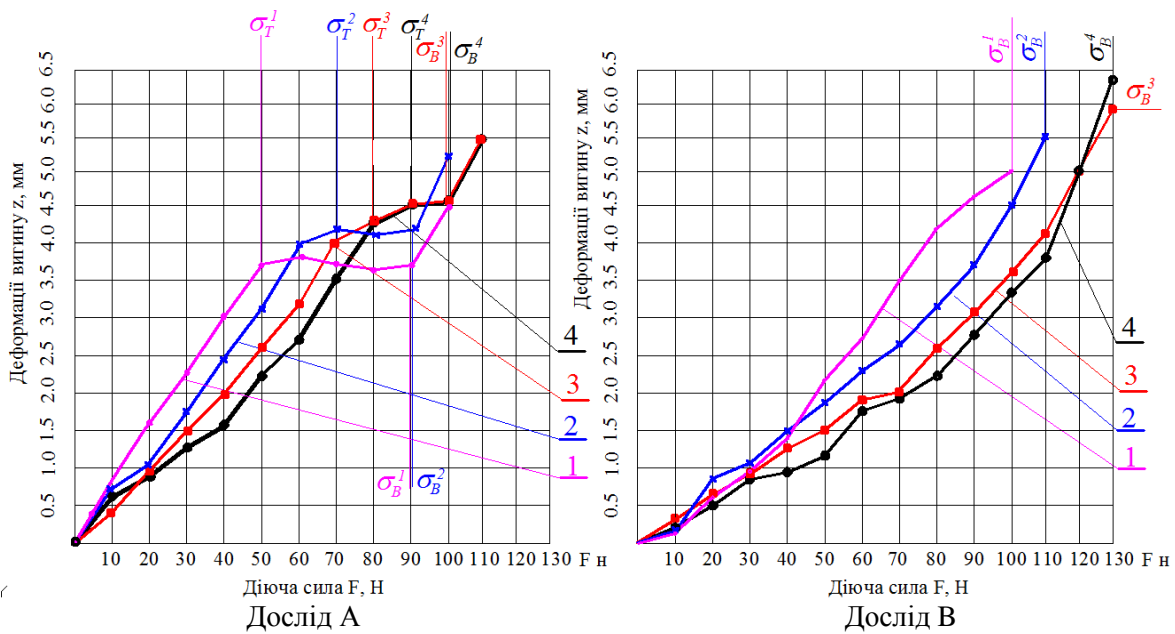


Рис. 3 – Графіки зміни деформації вигину z (мм) зразка від дії сили F (Н): А – з базуванням по площині 20×110 мм; В – з базуванням по площині 5×110 мм; 1 – комірку зразка формує 1 нитка; 2, 3 і 4 – комірку зразка формують 2, 3 і 4, нитки відповідно

Таблиця

Дані аналізу розрахунково-графічних і експериментальних значень

Дослід А (база по площині 20×110 мм)								Дослід В (база по площині 5×110 мм)				
k	z , мм	F_T , Н	F_B , Н	σ_T , МПа	σ_B , МПа	E , МПа	d , г/см ³	z , мм	F_B , Н	σ_B , МПа	E , МПа	d , г/см ³
4	4,55	90	100	27,27	30,14	1656	0,88	6,35	130	35,80	2603	0,90
3	4,50	80	100	27,27	30,14	1620	0,73	5,90	130	35,70	2243	0,78
2	4,25	70	90	24,51	27,36	1325	0,68	5,50	120	30,14	1656	0,75
1	3,70	50	90	13,59	24,46	1012	0,59	5,00	100	27,33	1401	0,65

k – кількість ниток, які формують стінки зразка – 4, 3, 2 і 1 нитка; z – прогин зразка під дією сили F ; σ_T , σ_B – межа плинності і межа міцності при дії сил F_T і F_B , відповідно; E – розрахунковий модуль пружності; d – питома вага зразка.

Така відмінність дозволяє зробити наступні висновки.

1. Зразки А і В істотно відрізняються за своїми фізико-механічними властивостями як при різній кількості ниток, які формують «кісткову» систему зразка, так і при базуванні заготовки на столі принтера, тобто міцність зразків відрізняється всередині групи для випробувань і між групами.

2. Руйнування всіх зразків в досліді В відбувалося при дії більшого зусилля і відповідного йому граничного напруження σ_B , ніж для досліду А (табл.). Має відзнаку також процес руйнування. Під час експерименту В відбувався практично миттєвий злам зразка (рис. 4, а). Під час експерименту А (рис. 4, б) спочатку спостерігалися ділянки накопичення пошкоджень і поява магістральних тріщин, що відповідало ділянці плинності σ_T , (для зразка А такої ділянки немає), далі утворюється тріщина в шарі (тобто в оболонці зразка), протилежному прикладеному зусиллю, і тільки потім руйнування. Якщо прибрати навантаження при появі тріщини, то спостерігається залишкова деформація зразка. З цього випливає, що при даному типі друкованої структури підвищена міцність досягається на шкоду гнучкості і навпаки.

3. Всі зразки створювалися з формуванням кордонів з 1, 2, 3 і 4 ниток. Аналізуючи графіки експериментальних даних (рис. 3), можна помітити, що зразки, які мають 3 і 4 нитки, аналогічні за своїми характеристиками міцності. Отже, для оптимального промислового застосуван-

ня досить створювати структури з двома або трьома нитками оболонки комірок, що узгоджується з даними інших досліджень [6, 7]. Крім того, цікавим спостереженням було те, що зразки з меншою щільністю d і модулем E були більш гнучкими, але мали меншу межу міцності σ_b , що перебуває в відповідності фізичним законам.

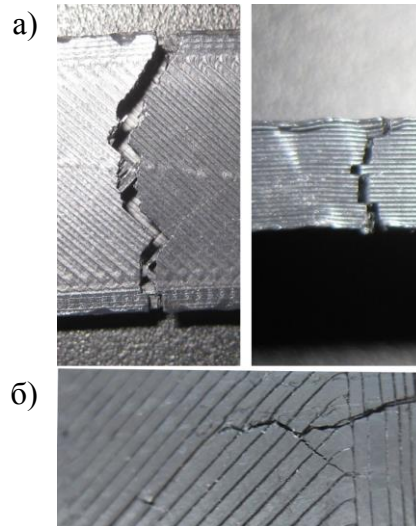


Рис. 4 – Злам зразків: а – для дослідів В; б – для дослідів А, поява тріщини з наступним зломом

Випробування на вигин прості за технікою виконання, але не вільні від похибок. Тому, щоб судити про точність отриманих результатів, слід переконатися в достовірності отриманих властивостей матеріалів. З цією метою виконаємо порівняльний аналіз матеріалів надрукованих зразків на 3D-принтері з різною внутрішньою структурою і значеннями прогинів від доданих зусиль з їх 3D-моделями навантаженими засобами системи Solidworks (SW), її додатком Solidcam Simulation. Тобто треба порівняти міцність на вигин експериментальних зразків зі зразками, побудованими 3D-графікою.

У Solidworks (SW) є бібліотека попередньо визначених матеріалів, проте в даному випадку, взявши за базовий пластик ABS, необхідно створити 8 матеріалів з новими властивостями, які виготовлені для дослідів А та В (число ниток $k = 1...4$). Нові властивості матеріалів з оригінальними межами плинності σ_t і міцності σ_b , модулем пружності E і питомою вагою d (г/см^3) створюємо за розрахунковими даними. 3D-моделі зразків з різною структурою для дослідів А і В побудовані засобами графічного редактора SW. Для впровадження симуляції дослідів за допомогою САЕ-системи створені моделі пластин зі «знятою» оболонкою, які призначені для настройки параметрів процесу моделювання прогинів зразків з гратчастою структурою, таких як розташування та розміри комірок сітки пластини, контакти між її секціями, тобто шарами, фіксація моделі на валиках типу «ролик повзун» (рис. 5).

Організуємо процес, в якому вихідними даними для САЕ-системи Solidcam Simulation будуть 3D-моделі зразків для дослідів А та В і зусилля на інтервалі з початковим значенням $F = 10$ Н до сили, що викликає максимальне напруження (межа міцності) σ_b в зразку (рис. 4, табл.), тобто за аналогією з проведенням експерименту.

За даними епюри переміщень, що відображається в графічному SW (рис. 6), отримуємо низку величин деформацій зразків з різною внутрішньою структурою (з числом ниток $k = 1...4$) і базуванням на столі принтера при виготовленні.

Вимірювання прогинів зразків при проведенні експериментів носять імовірнісний характер. Отже, різниця (відхилення) між експериментальними і теоретичними (розрахунковими в SW) значеннями також має імовірнісний характер. Для дослідів А з більш «гнучкими» зразками максимальна різниця між експериментальними і розрахунковими даними становить 0,8 мм, а для дослідів В з більш жорсткими зразками різниця становить 0,4 мм.

Статистичні характеристики, отримані за дослідними даними, ще не дозволяють аналізу-

вати характер зміни випадкової величини, тому окремо для дослідів А (38 відхилень вимірів, рис. 3) та дослідів В (47 відхилень вимірів) будуємо полігон розподілу відхилень (рис. 7). Для цього по осі ординат, де змінюються різниці між експериментальними і теоретичними даними, відкладаємо 10 інтервалів для дослідів А (рис. 7, а) шириною $0,8 : 10 = 0,08$ мм, для дослідів В (рис. 7, б) шириною $0,4 : 10 = 0,04$ мм. По осі абсцис відкладаємо частоти їх потрапляння в ці інтервали.

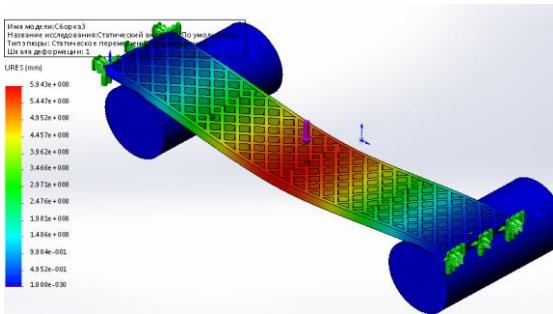


Рис. 5 – Модель зразка для досліду А, без оболонки

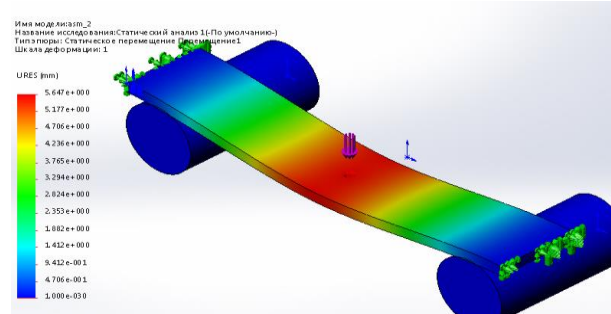


Рис. 6 – Модель зразка для дослідження САЕ-системою

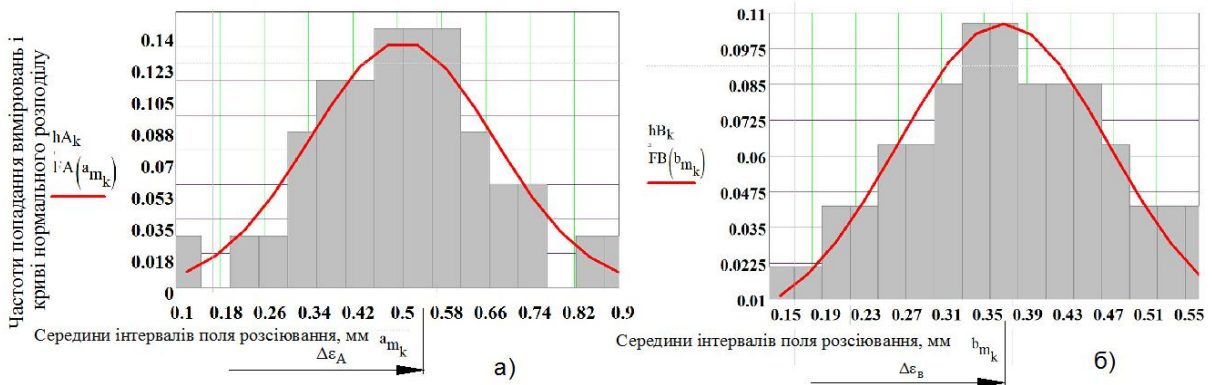


Рис. 7 – Для дослідів А (а) і В (б) гістограми розподілу і криві нормального розподілу відхилень між експериментальними і теоретичними даними прогинів зразків: a_{m_k} , b_{m_k} – середини інтервалів поля розсіювання відхилень дослідів А та В; h_{A_k} , $h_{B_{m_k}}$ – частоти попадання вимірювань в інтервали для дослідів А та В; $F_A(a_{m_k})$, $F_B(b_{m_k})$ – криві нормального розподілу відхилень дослідів А та В; $\Delta\varepsilon_A$, $\Delta\varepsilon_B$ – математичне очікування модулів відхилень дослідів А та В

Гістограми розподілу і криві нормального розподілу відхилень отримані за допомогою пакета MathCAD. Можливість віднесення отриманих кривих розподілу досліджуваних даних до типу кривих нормального розподілу встановлюємо за критерієм Пірсона при рівні значущості 0,05 і числом ступенів свободи 8. Розрахункові різниці $\Delta_p = \chi_{кр}^2 - \chi_{набл}^2$ між критичним значенням критерію $\chi_{кр}^2$ і спостережуваним $\chi_{набл}^2$ дорівнюють щодо досліду А: $\Delta_p^A = 0,105$, а для досліду В: $\Delta_p^B = 0,552$. Таким чином встановлена можливість прийняти нульову гіпотезу про нормальний розподіл даних генеральної сукупності дослідів А та В, проте дані досліду А знаходяться на межі розподілу цього типу.

В цілому спостерігається тотожність експериментальних і розрахункових САЕ-системою даних, проте отримані дані по прогину зразків під дією сили F і межі міцності σ_v свідчать про те, що експериментальні значення менші теоретичних. Слід також зазначити, що міцність матеріалу, отриманого 3D-печаткою, нижче міцності вихідного пластика.

Така відмінність може мати наступні причини:

1. 3D-моделі все ж залишаються найближчим уявленням реального зразка, в яких не враховується плинність нагрітого пластику, що полягає в його властивості не залишати гострі кути (концентратори напружень). Але якщо з цим недоліком шляхом значної витрати часу можна впоратися, то для визначення міцності спікання шарів необхідні лабораторні дослідження для кожного зразка.

2. Найбільша різниця між експериментальними і розрахунковими даними CAE-системи спостерігається при менших деформаціях і для більш гнучких зразків. Можна припустити причину цієї відмінності в наявності зони плинності, де діють складні нелінійні закони щодо відношення деформації і прикладеної сили.

3. Математичне сподівання в обох дослідах $\Delta \varepsilon_A$, $\Delta \varepsilon_B$ відхиляється від середини інтервалу, що свідчить про наявність впливу, що збурює, який має стаціонарний характер.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити перспективні рекомендації щодо структури пластиків, отриманих засобами 3D-друку. Таким чином, встановлено, що для збільшення міцності при вигині матеріалу надрукованого зразка комірки сітки з більшими властивостями міцності доцільно створювати в тому шарі, який під дією прикладеної сили відчуває розтягнення. В ході експерименту А для більш гнучкого зразка мала місце поява тріщини в його оболонці, що виникла з протилежного боку від прикладеної сили (рис. 4). У міру збільшення навантаження тріщина перетворилася в магістральну по всій ширині оболонки, але при цьому зразок зберігав здатність чинити опір навантаженню за рахунок розтягування сітчастої структури шарів зразка, яку можна було спостерігати візуально в утворену щілину. Зазначена властивість дозволяє економити пластик при збереженні міцності надрукованого матеріалу.

В Україні адитивні технології поки ще не є предметом першого вибору. Тому розробка на кафедрі технології машинобудування ДВНЗ «ПДТУ» і виготовлення на 3D-принтері деталі «Шестерня мастильна» циліндричного редуктора є піонерським рішенням в галузі важкого машинобудування. Отриманий акт впровадження є підсумком першого етапу перспективної роботи, для продовження якого необхідна інженерна підготовка, яка включає широке використання CAE-систем. Треба відзначити, що навіть CAE-системи високого рівня поки не мають окремих додатків для роботи з деталями, створеними за адитивною технологією. За підсумками даної роботи можна зробити висновок, що моделювання міцності властивостей об'єктів, створених засобами 3D-друку, можливо за умови створення на підприємстві бібліотеки коригувальних коефіцієнтів, отриманих на основі аналізу статистичної інформації.

Перелік використаних джерел:

1. Шнира А.В. Підвищення точності 3D-друку / А.В. Шнира, Б.В. Чапалюк, А.І. Алімов // Technical Using of Measurement : тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології (2-6 лютого 2015 р.; Славське). – Славське, 2015. – С. 112-115.
2. ГОСТ 4648-73. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – Введ. 1973-01-01. – М. : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1973. – 12 с.
3. Камоничкина Н.В. Исследование прочностных характеристик модельного материала, получаемого методом FDM-печати с использованием ABS-пластика / Н.В. Камоничкина, И.В. Кочешков [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://st3d.ru/kamonichkin/strength_of_3dprint_products/.
4. Kolian M. Основы 3D-моделирования для 3D-печати / М. Kolian [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://habr.com/ru/post/417605/>.
5. Балашов А.В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / А.В. Балашов, А.В. Маркова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. – С. 1-15.
6. 3D-принтер. Заполнение и прочность. Функциональный дизайн за пределами CAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://wikihandbk.com/wiki/3D>.
7. Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts / K. Savvakis, M. Petousis, A.M. Vairis, N. Vidakis, L.T. Bikmeyer // American Society of Mechanical Engineers-International Mechanical Engineering Congress & Exposition. – 2014. – Pp. 1-6. – Mode of access: DOI: 10.1115/IMECE2014-37553.

References:

1. Shnira A.V., Chapaliuk B.V., Alimov A.I. Pidvishchennia tochnosti 3D-druku. *Tezi dopovidei Mizhn. nauk.-tehn. konf. «Technical Using of Measurement»* [Improve 3D-printing accuracy. Proceedings of Int. Sci.-Pract. Conf. «Technical Using of Measurement»]. Slavs'ke, 2015, pp. 112-115. (Ukr.)
2. GOST 4648-73. *Plastmassy. Metod ispytaniia na staticheskii izgib* [Plastics. Static bending test method]. Moscow, Komitet standartizatsii i metrologii SSSR Publ., 1973. 10 p. (Rus.)
3. Kamonichkina N.V., Kocheshkov I.V. *Issledovanie prochnostnykh kharakteristik model'nogo materiala, poluchaemogo metodom FDM-pechati s ispol'zovaniem ABS-plastika* (The study of the strength characteristics of the model material obtained by FDM printing using ABS plastic) Available at : www.st3d.ru/kamonichkin/strength_of_3dprint_products (accessed 15 July 2019) (Rus.)
4. Kolian M. *Osnovy 3D-modelirovaniia dlia 3D-pechati* [3D-modeling basics for 3D-printing] Available at : www.habr.com/ru/post/417605 (accessed 05 June 2019) (Rus.)
5. Balashov A.V., Markova A.V. *Issledovanie struktury i svoistv izdelii, poluchennykh 3D pechat'iu* [Study of the structure and properties of products obtained by 3D-printing]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Herald of Don*, 2019, no. 1, pp. 1-15. (Rus.)
6. *3D-printer. Zapolnenie i prochnost'. Funktsional'nyi dizain za predelami CAD* (3D-printer. Filling and strength. Functional Design Outside of CAD) Available at : www.wikihandbk.com/wiki/3D (accessed 3 May 2019) (Rus.)
7. Savvakis K., Petousis M., Vairis A.M., Vidakis N., Bikmeyer L.T. Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts. *American Society of Mechanical Engineers-International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1115/IMECE2014-37553.

Рецензент: О.О. Анділахай
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 16.10.2019

УДК 621.923.74

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201064

© Бурлаков В.І.*

ДО ПИТАННЯ ПРО ОБРОБЛЮВАННІСТЬ НІТРИДНОЇ КЕРАМІКИ М'ЯКИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ

Розвиток сучасного машинобудування пов'язаний з розробкою і впровадженням нових матеріалів і прогресивних технологічних процесів їх обробки. Унікальні властивості кераміки дозволяють використовувати її в різних областях техніки, в тому числі в якості різального інструменту та деталей машин, приладів, радіоелектронної апаратури. Через високу твердість матеріалу механічна обробка перелічених заготовок можлива лише з використанням синтетичного алмазу, але синтетичні алмази досить дорогі, тому необхідно вирішувати проблему заміни дорогих матеріалів на більш дешеві. У статті зроблена спроба розкрити можливість обробки м'яким абразивом нітридної кераміки, яка є набагато твердішою за абразив. Зроблено припущення про те, що м'який абразив у процесі зносу не припиняє роботу по видаленню матеріалу з керамічної поверхні. Доведено графічно та математично, що знімання матеріалу не припиняється.

Ключові слова: м'який абразив, нітридна кераміка, видалення матеріалу, керамічна поверхня, абразивне зношування інструменту, різальна кромка інструменту, сферичні мікрочастинки, вириви.

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь