

Адаптивне пошарове розділення 3d моделі виробу в адитивних технологіях

Представлено результати дослідження можливостей адаптивного пошарового розділення вихідної 3D моделі, заданої STL-файлом при формоутворенні виробу за допомогою адитивних технологій. Запропонований спосіб адаптивного розділення 3D моделі дозволяє підвищити продуктивність процесу і регулювати точність виготовлення виробів за допомогою завдання кроку побудови для кожного окремого опускання робочої платформи установки. Крок побудови вибирається з урахуванням щільності розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь виробу від вектора напрямку побудови.

Оцінка ефективності адаптивного пошарового розділення виконувалася на основі порівняльного аналізу кількості шарів для виготовлення моделей найпростіших геометричних фігур і складних промислових виробів. Пошарове розділення виконувалося з використанням спеціально розробленої підсистеми до системи «Технологічна підготовка матеріалізації складних виробів адитивними технологіями».

Ключові слова: адитивні технології; технологічна підготовка; триангуляційна модель; пошарове розділення; точність формоутворення.

Постановка проблеми. Однією з основних задач підготовки до матеріалізації виробу адитивними технологіями є пошарове розділення вихідної 3D моделі [1]. Рішення даної задачі досить істотно визначає ефективність використання адитивних технологій. Кількість шарів впливає на час побудови виробу. Точність пошарового формоутворення при розгляді виробу в січній площині, що проходить через координатну вісь O_z (напрямок побудови) в основному визначається товщиною шарів і орієнтацією поверхні [2]. Наприклад, похилі поверхні, нормаль яких нахилена під невеликим кутом до вектора напрямку побудови, мають найбільш виражений «ступінчастий» вигляд.

В ряді випадків забезпечення раціонального співвідношення продуктивності виготовлення та точності формоутворення поверхонь можливе при застосуванні адаптивних способів пошарового розділення вихідної 3D моделі [3, 4].

Результатом процедури розділення 3D-моделі паралельними площинами за заданим кроком є набір (масив) перерізів і товщин шарів.

Одиничний зріз полігональної (триангуляційної) 3D моделі (як правило це файл STL-формату) утворюється шляхом перетину площиною XU . Рішення даної задачі має дві проблеми: перша – визначення товщини шару (кроку побудови), а друга пов'язана з визначенням геометрії замкнутого контуру або декількох контурів, що повинні не перетинатися.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих роботах використовуються наступні підходи щодо реалізації стратегій нарізки:

- рівномірне розсічення набором площин полігональної 3D-моделі виробу (STL-файлу) з використанням кусково-лінійних кривих для опису контуру перетину [5–7];
- адаптивне розсічення STL-файлу з використанням кусково-лінійних кривих для опису контуру перетину [8, 9];
- адаптивне розсічення CAD-моделі з подальшим використанням кусково-лінійної апроксимації контуру [10, 11];
- рівномірне або адаптивне розсічення CAD-моделі з точним або приблизним описом контуру кривими лініями [12–14].

Звичайна стратегія нарізки здійснюється при постійному кроці побудови, тобто при однаковій товщині всіх шарів [3]. Такий підхід не враховує особливості геометрії виробу і, отже, призводить до зниження точності або продуктивності виготовлення. Адаптивні стратегії, засновані на використанні змінного кроку побудови, розробляються з метою усунення даного недоліку [4]. Змінний крок побудови визначається з урахуванням заданого критерію на основі аналізу 3D моделі в поточному шарі.

Основна проблема полягає в тому, що в існуючих роботах при адаптивному нарізанні 3D моделей крок побудови вибирається виходячи з граничних значень кутів нахилу нормалей поверхонь, що потрапили в січучу площину. При врахуванні розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь та їх площин з'являється можливість для обґрунтованого вибору граничних їх значень для визначення раціонального кроку побудови. У даній роботі розглянуто наукову гіпотезу про те, що статистичний аналіз розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь, що потрапили в перетин шару з урахуванням їх відносної площі, дозволить науково обґрунтовано визначати крок побудови для забезпечення заданої точності і зменшення часу побудови виробу.

Мета дослідження. Вивчити можливості адаптивного розсічення вихідної 3D-моделі при визначенні кроку побудови на основі статистичного аналізу розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь щодо забезпечення заданої точності формоутворення з мінімальним часом виготовлення виробу.

Робота пов'язана з виконанням НДР Національного технічного університету «ХПІ»: «Підвищення точності виготовлення виробів селективним лазерним спіканням шляхом компенсації залишкових деформацій на етапі підготовки до матеріалізації» (ДР № 0117U004882).

Викладення основного матеріалу. Реалізація переходу від вихідної триангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів (2D-перетинів) виконувалася в рамках системи «Технологічна підготовка матеріалізації складних виробів адитивними технологіями», розробленої на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Дана система дозволяє виконувати оцінку технологічності конструкції та ефективності вирішення задач технологічної підготовки на основі статистичного аналізу досліджуваних ознак полігональної, воксельної і пошарової моделі виробу. Для вирішення поставленої задачі розроблена підсистема статистичного пошарового аналізу. Екранна форма підсистеми представлена на рисунку 1.

Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості:

- створення набору шарів з 2D-перетинами на основі полігональної 3D-моделі виробу (STL-файлу) за заданою стратегією формування (з постійним або змінним кроком побудови);
- візуалізація контуру перетину для поточного шару з урахуванням масштабу відображення;
- статистичний аналіз і побудова гістограм розподілу досліджуваних ознак (кутів нахилу щодо осі Z нормалей граней, що перетинаються шаром і суміжних кутів між елементами контуру);
- аналіз фрактальної розмірності контурів;
- визначення основних статистичних характеристик, які виводяться в єдину таблицю для всіх шарів;
- створення форм візуалізації результатів аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності.

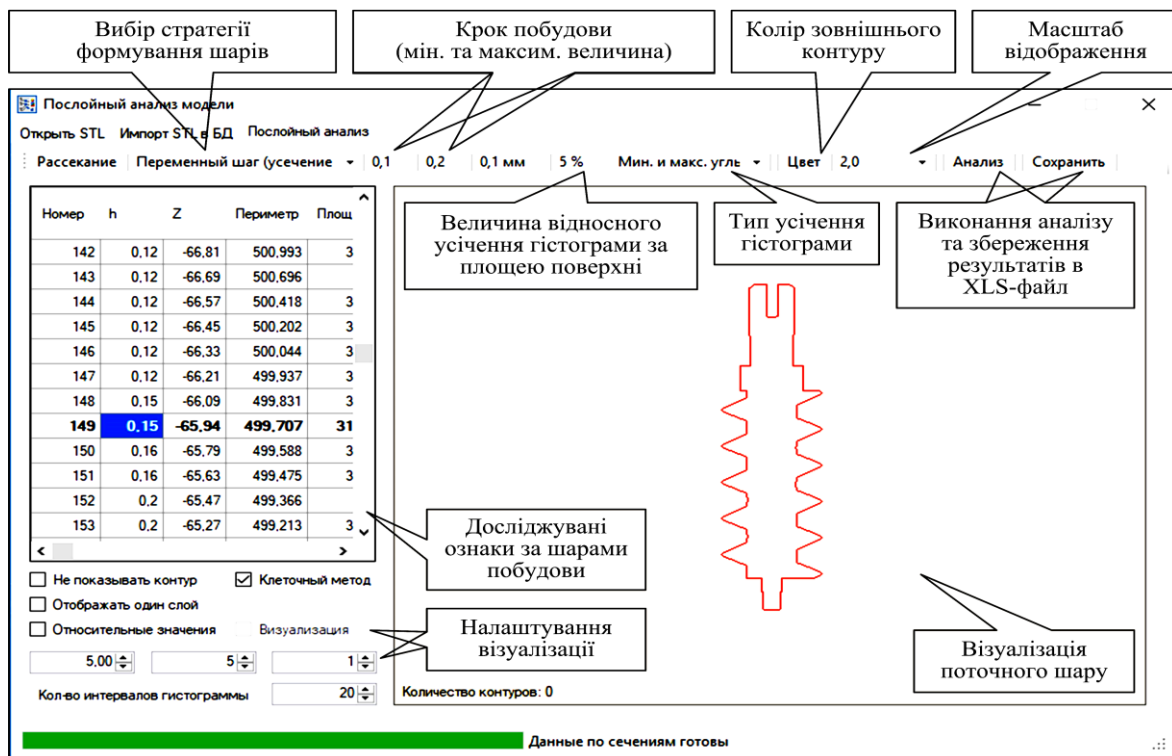


Рис. 1. Підсистема пошарового аналізу 3D-моделі виробу

Перехід від вихідної триангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів виконувався за процедурою, з урахуванням існуючих робіт [15, 16], що реалізує стратегії з постійним та змінним кроком побудови.

При виконанні процедури пошарового розділення моделі на першому етапі створюється список координат шарів Z_{Ci} . На другому - визначення контурів для кожного шару. Список координат Z_{Ci} формувалася за наступною залежністю:

$$Z_{Ci} = Z_{Ci} + h_i, \quad Z_{Ci} \in [Z_{min}, Z_{max}], \quad (1)$$

де Z_{min} , Z_{max} – мінімальна та максимальна координата вершин триангуляційної 3D моделі;

h_i – крок побудови, який для стратегії з постійним кроком $h_i = const$, а для адаптивної стратегії вибираються у заданому інтервалі $h_i \in [h_{min}, h_{max}]$;

h_{min} , h_{max} – мінімальне і максимальне значення допустимого інтервалу кроків побудови для використовуваних обладнання і матеріалу виробу.

За методами адаптивного пошарового розділення 3D моделі, як правило, крок побудови h_i задається з урахуванням заданого обмеження Δ_S щодо відхилення від правильної форми поверхонь (гранично допустимої похибки формоутворення) [16]:

$$h_i = \Delta_S / \cos \varphi_{NZ min}, \quad (2)$$

де $\varphi_{NZ min}$ – мінімальний кут нахилу щодо осі Z нормалі граней в i -му шарі.

Рішення задачі адаптивного пошарового розділення 3D моделі складного виробу включає в себе наступні проблеми:

- необхідність врахувати всю поверхню моделі між площинами, що визначають поточний і наступний шар;
- нерівномірний розподіл площі цієї поверхні за кутами φ_{NZ} .

Перша проблема виникає через первісну невизначеність поточного кроку побудови h_i . У запропонованому методі адаптивного розділення дана проблема вирішується початковим розсіченням 3D моделі з кроком, рівним дискретності завдання розташування шару Z_i від поточної площини до площини, що визначається найбільшою допустимою величиною h_{max} . Друга проблема виникає у зв'язку з матеріалізацією 3D моделей складних за геометрією промислових виробів.

Наслідком обох проблем є необґрунтоване завдання кроку побудови за неповною інформацією щодо утвореної поверхні поточним шаром. У зв'язку з існуючим нерівномірним розподілом площі поверхні за кутами φ_{NZ} для складних виробів крок побудови h_i , що задається за відомою залежністю (2) є заниженим. На практиці враховувати поверхні з нормаллями, що мають гранично мінімальне відхилення від осі Z (напрямку побудови), може бути надмірним у тих випадках коли їх відносна площа менша від загальної на 5÷20%. Таку обставину можна врахувати при визначенні $\varphi_{NZ min}$ шляхом усічення щільності розподілу φ_{NZ} в поточному шарі по відносній площі на допустиму величину. Допустима величина усічення повинна визначатися за своїм впливом на підсумкові показники якості і точності поверхні виробу. Таке усічення дозволить збільшити кут і відповідно, з урахуванням залежності (2), збільшити допустиму величину кроків побудови h_i . В результаті з'являється можливість при забезпеченні заданого граничного відхилення від правильної форми поверхні мінімізувати кількість шарів і час побудови.

Приклад можливого усічення розподілу величин φ_{NZ} одержуваних в площині шару показано на рисунку 2. Наведений приклад на рис. 2 а відноситься до небажаних для виконання усічення розподілу величини φ_{NZ} тому, що не дозволяє суттєво змінити граничне значення $\varphi_{NZ min}$.

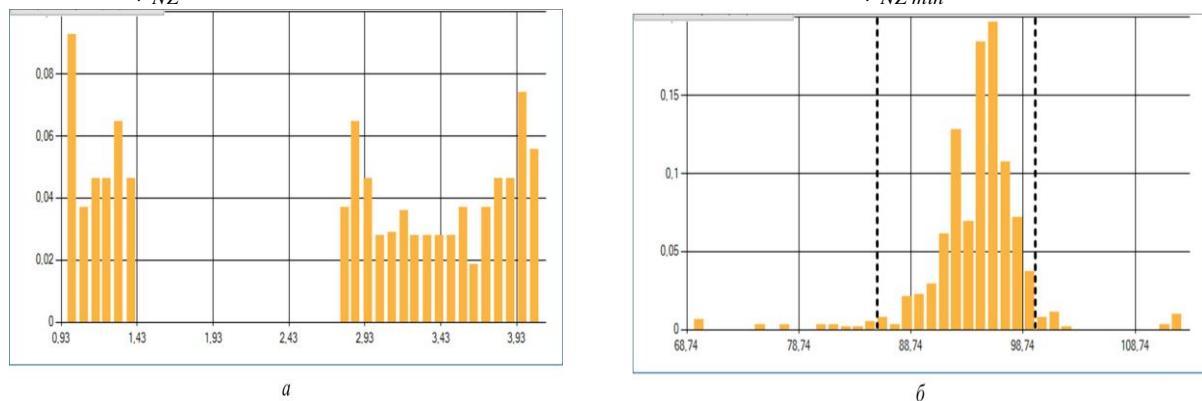


Рис. 2. Гістограми щільності розподілу величини φ_{NZ} у шарах побудови:

без можливості суттєвого змінення кута $\varphi_{NZ min}$ (а), при зменшенні інтервалу значень φ_{NZ} більше ніж у 3 рази за умови усічення 5% площі (ймовірність знаходження за межами довірчого інтервалу – 0.05) (б)

Приклад розподілу величини Φ_{NZ} більш ефективного для усічення наведено на рисунку 2 б. При усіченні розподілу на 5 % за площею вдається зменшити $\Phi_{NZ \min}$. Такий вид розподілу Φ_{NZ} відноситься до найбільш поширених серед шарів побудови як для складних за геометрією виробів.

Запропонована адаптивна стратегія пошарового розділення 3D моделі виконується за схемою, представленою на рисунку 3.

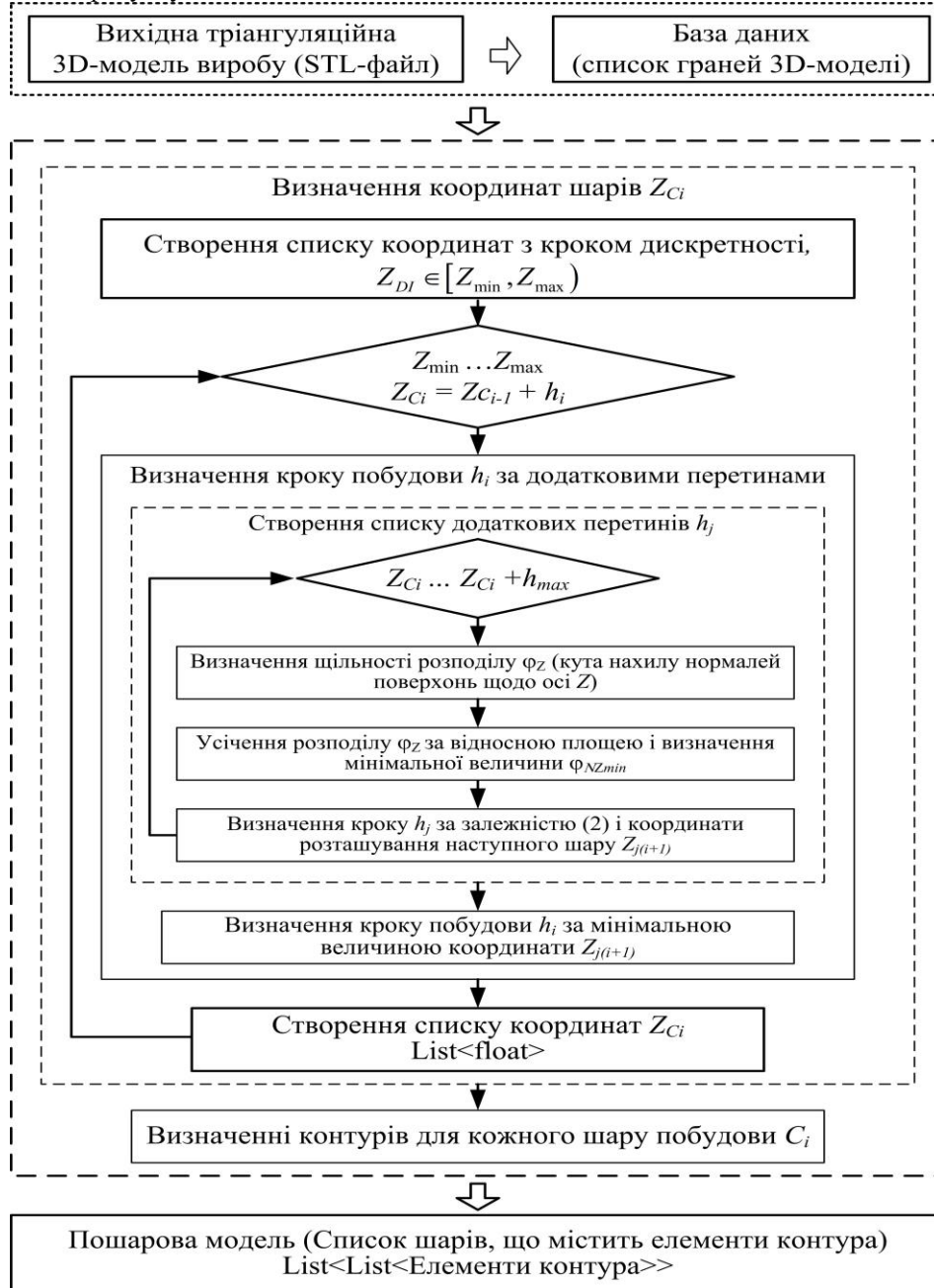


Рис. 3. Схема адаптивного пошарового розділення 3D моделі

Дослідження можливостей стратегій розділення 3D моделі виконано шляхом порівняльного аналізу за кількістю шарів N_L визначених для тестових моделей простих геометричних тіл і складних промислових виробів (рис. 4).

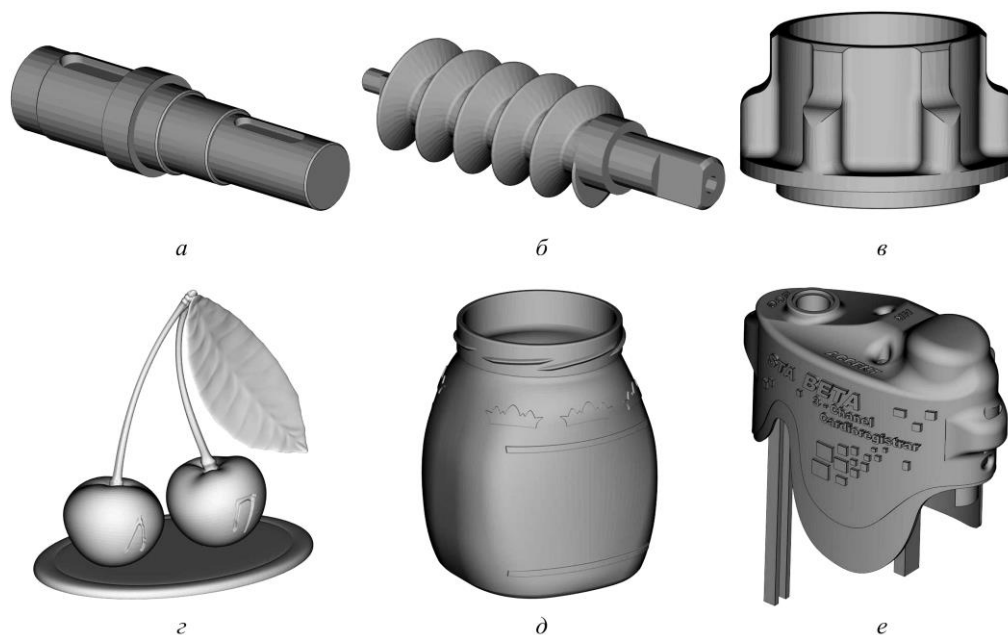


Рис. 4. Тестові 3D-моделі:
а) вал; б) шнек; в) корпус; г) сувенір; д) ємність; е) кришка

З методичних міркувань виконано порівняння наступних стратегій:

- з постійним кроком, $h_i = h_{min}$;
- зі змінним кроком (враховуються трикутні грані, що перетинаються площиною шару), що визначається за залежністю (2);
- зі змінним кроком (враховуються трикутні грані в межах товщини шару);
- зі змінним кроком (з допустимим усіченням розподілу кута φ_{NZ}).

Стратегія з постійним кроком виконувалася при заданні $h_i = 0.1$ мм. Адаптивні стратегії зі змінним кроком реалізовувалися за наступними обмеженнями $\{h_i\}_{min} = 0.1$ мм, $\{h_i\}_{max} = 0.3$ мм, максимально допустимою похибкою формування поверхні $\Delta_s = 0.1$ мм та урізанні гістограми розподілу кутів φ_{NZ} на відносну величину площі $\Delta\varphi_{NZ} = 5\%$. Результати розрахунків для порівняння чотирьох стратегій приведено у таблицях 1, 2.

Аналіз даних за табл. 1 демонструє перевагу стратегій зі змінним кроком у порівнянні з постійним кроком. Але ця перевага є загальною для стратегій зі змінним кроком незалежно від обраного підходу у визначенні кроку побудови.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових моделей простих геометричних тіл за кількістю шарів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Кількість шарів, N_L			
		Постійний крок	Змінний крок (за одним перерізом)	Змінний крок (за мікроперерізах)	Змінний крок (з усічення розподілу φ_{NZ})
1	Куб ($L = 100$)	1000	334	333	333
2	Сфера ($D = 100$)	1000	579	594	591
3	Конус ($D = 100$, $H = 100$)	1000	455	455	455
4	Тор ($D = 100$, $d = 10$)	100	59	60	60
5	Циліндр ($D=100$, $H=100$)	1000	334	333	333
6	Пружина (100x100x10)	1100	1100	1100	1099

Таблиця 2

Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових моделей промислових виробів за кількістю шарів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Кількість шарів, N_L			
		Постійний крок	Змінний крок (за одним перерізом)	Змінний крок (за мікро-перерізах)	Змінний крок (з усічення розподілу Φ_{NZ})
1	Вал (64×64×138)	600	424	432	431
2	Шнек (40×40×144)	401	328	339	314
3	Корпус (210×210×125)	1251	569	582	566
4	Сувенір (73×51×70)	702	498	514	430
5	Ємність (102×94×125)	1256	584	595	555
6	Кришка (84×101×43)	433	392	405	360

Результати модельних розрахунків на прикладі 3D моделей промислових виробів дозволили виявити відмінність в стратегіях зі змінним кроком побудови. Дана відмінність за кількістю шарів N_L збільшується для складних за геометрією виробів. Отримані дані (табл. 2) дозволяють зробити висновок про ефективність запропонованої стратегії з усіченням розподілу кута Φ_{NZ} для досить складних за геометрією виробів.

Окрім вивчення запропонованої стратегії зі змінним кроком виконувалося при варіюванні величини відносного усічення розподілу кута Φ_{NZ} . За результатами дослідження на прикладі моделі сувеніра визначено загальну тенденцію, що представлена на рисунку 5. Модель сувеніра обрана як найбільш складна з розглянутих.

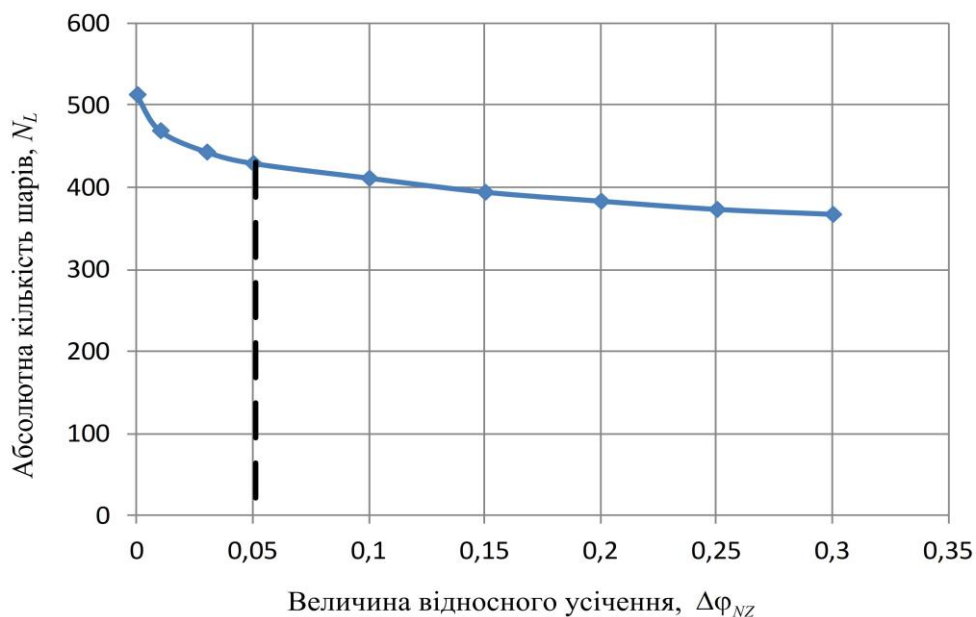


Рис. 5. Залежність кількості шарів побудови моделі сувеніра (рис. 4 з) від відносної величини усічення щільності розподілу кута Φ_{NZ}

Виходячи з одержаних результатів модельних досліджень (рис. 5) можна визначити раціональний рівень усічення розподілу Φ_{NZ} . Щодо моделі сувеніра достатнім є усічення розподілу величини кута Φ_{NZ} на відносну величину $\Delta\Phi_{NZ} \leq 0.2$ за площею. Подальше збільшення $\Delta\Phi_{NZ}$ не дає істотного зменшення кількості кроків побудови при достатньому впливі на середню величину відхилення від правильної форми поверхонь виробу. Стосовно до моделі сувеніра раціональною величиною усічення є $\Delta\Phi_{NZ} = 0.05$.

Висновки та перспективи подальших розвідок. За результатами досліджень підтверджено можливість шляхом статистичного аналізу розподілу кутів нахилу від осі Z нормалей поверхонь, що потрапили в перетин шару з урахуванням їх відносної площі науково обґрунтовано визначати крок побудови для забезпечення заданої точності і зменшення часу побудови виробу.

Усічення розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь на відносну величину $\Delta\varphi_{NZ} \leq 0.05$ від їх площі дозволяє для моделей складних виробів зменшити час їх побудови на $7 \div 16$ %.

Результати роботи створюють методологічну основу для комплексного вирішення задач технологічної підготовки адитивного виробництва. Подальші дослідження слід спрямувати на спільне вирішення наступних задач: декомпозиція виробу з його раціональною орієнтацією та розміщенням в робочому просторі установки з урахуванням розподілу шарів побудови.

Список використаної літератури:

1. Zhang Y. AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context / Y.Zhang, A.Bernard // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. – 2014. – Pp. 1259–1276 [On-line]. – Access mode : <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf>.
2. Byun H.S. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing / H.S. Byun, K.H. Lee // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2006. – № 28. – Pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5.
3. Пат. 4863538 США, МПК В 27 N 3/00, В 32 В 31/00, В 23 К 9/00, В 29 С 67/00. Method and apparatus for producing parts by selective sintering / C.R. Deckard ; Board of Regents ; The University of Texas System. – № 920580 ; filed 17.10.1986 ; date of print 05.09.1989 [On-line]. – Access mode : <https://www.google.com.ua/patents/US4863538>.
4. Пат. 46418 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі / В.Л. Доброскок, С.І. Чернишов, Ю.Б. Вітязев, Л.Н. Абдурайімов ; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т «Харківський політехн. ін-т». – № u200905500 ; заявл. 01.06.2009 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.
5. Rock S.J. Utilizing topological information to increase scan vector generation efficiency / S.J. Rock, M.J. Wozny // Solid Freeform Fabrication Symposium Proc. – Austin (Texas). – 1991, Aug. 12–14. – pp. 28–36.
6. An algorithm to slice 3D shapes for reconstruction in prototyping systems / K.L. Chalasani, B.N. Grogan, A.Bagchi, C.C. Jara-Almonte, A.A. Ogale, R.L. Dooley // Proceedings of the 1991 ASME Computers in Engineering Conference. – Aug., 1991. – Pp. 209–216.
7. Kirschman C.F. A parallel slicing algorithm for solid freeform fabrication processes / C.F. Kirschman, C.C. Jara-Almonte ; in Marcus, H.L. et al. (Eds) // Solid Freeform Fabrication Symposium 1992 ; University of Texas. – Austin. – Aug., 1992. – Pp. 26–33.
8. Marsan A. A survey of process planning techniques for layered manufacturing / A.Marsan, D.Dutta // Proceedings of the 1997 ASME Design Automation Conference. – Sacramento (CA). – Sept., 1997.
9. Dolenc A. Slicing procedures for layered manufacturing techniques / A.Dolenc, I.Makela // Computer-Aided Design. – Febr., 1994. – Vol. 26, № 2. – Pp. 119–126.
10. Direct slicing from PowerSHAPE models for Rapid Prototyping / X.Chen, C.Wang, X.Ye and other // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. – 2001. – Vol. 17, № 7. – Pp. 543–547.
11. Sun S.H. Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping / S.H. Sun, H.W. Chiang, M.I. Lee // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. – 2007. – Vol. 34, № 7–8. – Pp. 689–701.
12. Cao W. Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping / W.Cao, Y.Miyamoto // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. – 2003. – Vol. 21, № 10–11. – Pp. 739–742.
13. Zhou M.Y. Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping / M.Y. Zhou, J.T. Xi, J.Q. Yan // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. – 2004. – Vol. 23, № 1–2. – Pp. 20–27.
14. Farouki R.T. Computational methods for rapid prototyping of analytic solid models / R.T. Farouki, T.Konig // Rapid Prototyping Journal. – 1996. – Vol. 2, No. 3. – Pp. 41–49.
15. Pandey P.M. Slicing procedures in layered manufacturing: a review / P.M. Pandey, N.V. Reddy, S.G. Dhande // Rapid Prototyping Journal. – 2003. – Vol. 9. – Issue 5. – Pp. 274–288 [On-line]. – Access mode : <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>.
16. Абдурайімов Л.Н. Адаптивное разделение на слои исходной 3D модели изделия в технологиях быстрого прототипирования и изготовления / Л.Н. Абдурайімов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Серия : Технические науки. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2009. – Вып. 18. – С. 15–20.

References:

1. Zhang, Y. and Bernard, A. (2014), «AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context», *Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1259–1276, available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf>
2. Byun, H.S. and Lee, K.H. (2006), «Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, No. 28, pp. 307–313, DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5

3. Deckard, C.R., The University of Texas System (1989), *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*, МПК В 27 N 3/00, В 32 В 31/00, В 23 К 9/00, В 29 С 67/00. № 920580, USA, filed 17 oct., date of print 05 sept., Pat. № 4863538, available at: <https://www.google.com.ua/patents/US4863538>
4. Dobroskok, V.L., Chernyshov, S.I., Vitjazjev, Ju.B. and Abdurajimov, L.N., Nac. tehn. un-t «Harkivs'kyj politehn. in-t» (2009), *Sposib posharovoi' pobudovy vyrobiv na bazi vyhidnoi' trianguljacijnoi' 3D modeli* [The method of layered construction of products based on the original triangulation 3D model] МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50, Ukraї'na, № u200905500, zajavl. 01 chervnja, opubl. 25 grudnja, Bjul. № 24, Pat. № 46418.
5. Rock, S.J. and Wozny, M.J. (1991), «Utilizing topological information to increase scan vector generation efficiency», *Solid Freeform Fabrication Symposium Proc.*, from 12–14 Aug., Austin (Texas), pp. 28–36.
6. Chalasani, K.L., Grogan, B.N., Bagchi, A., Jara-Almonte, C.C., Ogale, A.A. and Dooley, R.L. (1991), «An algorithm to slice 3D shapes for reconstruction in prototyping systems», *Proceedings of the 1991 ASME Computers in Engineering Conference*, from Aug., pp. 209–216.
7. Kirschman, C.F. and Jara-Almonte, C.C. (1992), «A parallel slicing algorithm for solid freeform fabrication processes», *Solid Freeform Fabrication Symposium 1992*, in Marcus, H.L. et al. (Ed), from Aug., University of Texas, Austin, pp. 26–33.
8. Marsan, A. and Dutta, D. (1997), «A survey of process planning techniques for layered manufacturing», *Proceedings of the 1997 ASME Design Automation Conference*, from Sept., Sacramento (CA).
9. Dolenc, A. and Makela, I. (1994), «Slicing procedures for layered manufacturing techniques», *Computer-Aided Design*, from Febr., Vol. 26, No. 2, pp. 119–126.
10. Chen, X., Wang, C., Ye, X. and others (2001), «Direct slicing from PowerSHAPE models for Rapid Prototyping», *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 17, No. 7, pp. 543–547.
11. Sun, S.H., Chiang, H.W. and Lee, M.I. (2007), «Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping», *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 34, No. 7–8, pp. 689–701.
12. Cao, W. and Miyamoto, Y. (2003), «Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping», *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 21, No. 10–11, pp. 739–742.
13. Zhou, M.Y., Xi, J.T. and Yan, J.Q. (2004), «Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping», *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 23, No. 1–2, pp. 20–27.
14. Farouki, R.T. and Konig, T. (1996), «Computational methods for rapid prototyping of analytic solid models», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 3, pp. 41–49.
15. Pandey, P.M., Reddy, N.V. and Dhande, S.G. (2003), «Slicing procedures in layered manufacturing: a review», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, Issue 5, pp. 274–288, available at: <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>
16. Abdurajimov, L.N. (2009), «Adaptivnoe razdelenie na sloi ishodnoj 3D modeli izdelija v tehnologijah bystrogo prototipirovanija i izgotovlenija», *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta, Serija Tehniceskie nauki*, Vol. 18, NIC KIPU, Simferopol', pp. 15–20.

Гарашенко Ярослав Миколайович – кандидат технічних наук, докторант кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- адитивні технології;
- зворотній інжиніринг;
- моделювання алмазно-абразивних інструментів.

Тел.: (067) 189–20–05.

E-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2018.