

КОМПЕНСАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ У ВИРОБАХ ПРИ АДИТИВНОМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

В.А. Матвійчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: matviychuk@technobeam.com.ua

Метою роботи є аналіз та оптимізація формоутворення лопатки ГТД в процесі виготовлення за адитивною електронно-променевою технологією. Методом комп'ютерного моделювання в програмі Simufact Additive досліджено вплив технологічних параметрів друку на формоутворення виробу, здійснено аналіз усадкових явищ, які виникають в процесі друку. Проведено симуляцію друку та порівняння отриманих результатів з еталонною моделлю. Створено оптимізовані комп'ютерні моделі лопаток ГТД. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу $\pm 0,3$ мм. Бібліогр. 6, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: адитивні технології, електронний промінь, наплавлення, моделювання, формоутворення, 3D принтер

Вступ. При створенні виробів з металу адитивним методом у процесі пошарового нагріву та охолодження відбуваються локальні усадкові явища, які призводять до загальних залишкових деформацій – викривлення лінійних розмірів надрукованої деталі [1–3]. Для компенсації залишкових деформацій виникає потреба в корекції моделі виробу з урахуванням очікуваних деформацій.

У процесі друку на форму виробів впливає низка факторів:

- матеріал, з якого виробляється деталь;
- технологічні параметри друку;
- просторове положення виробу відносно платформи;
- розташування деталі в збірці виробів;
- форма технологічних опор;
- загальна температура збірки виробів та оточуючого середовища.

Вважаючи на те, що вироби зазвичай мають складну геометричну форму, виникає проблема отримання кінцевого виробу з необхідними розмірами в межах допусків. Для вирішення цієї проблеми передбачається застосувати методи комп'ютерного моделювання процесу друку з наступним корегуванням моделі, за якою буде надруковано виріб [2].

Метою роботи є аналіз та оптимізація формоутворення лопатки ГТД в процесі виготовлення за адитивною електронно-променевою технологією.

У роботі задіяний програмний продукт Simufact Additive, розроблений компанією MSC Software. Це спеціалізований програмний комплекс, призначений для моделювання 3D друку деталей із

металів за технологією розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі (Powder Bed Fusion), включаючи процеси селективного лазерного плавлення (Selective Laser Melting (SLM)), прямого лазерного спікання металів (Direct Metal Laser Sintering (DMLS)), селективного лазерного плавлення металевих порошкових матеріалів (Laser CUSING), електронно-променевого наплавлення (Electron Beam Melting (EBM)) та ряд інших процесів [4].

Simufact Additive надає можливість:

- обчислити деформації деталі та зменшити або взагалі уникнути спотворення її форми;
- порівняти результати моделювання з еталонною формою;
- вибрати оптимальний напрямок друку;
- оптимізувати підтримуючі структури (опори);
- отримати стан деталі після термічної обробки, видалення опорної плити та підтримуючої структури;
- мінімізувати залишкові напруження.

Вирішувач MARC [5] є основою програми Simufact Additive. MARC має розвинуті можливості для проведення зв'язаного температурного і термомеханічного аналізу напружено-деформованого стану виробу при пошаровому друку, враховуючи термічні деформації і властивості матеріалу в залежності від температури.

Для проведення розрахунків використовують спеціальний генератор воксельної сітки. Вокселі – це елементарні осередки, з яких складається досліджувана модель виробу. Створюється регулярна сітка, яка використовується для моделювання пошарового друку деталі. У вирішувачі MARC додана можливість послідовної активізації воксельних шарів. Також додані нові методи моделювання

процесу різання, які необхідні для моделювання процесу видалення опорної пластини та підтримуючої структури.

У Simufact Additive використовується два підходи для оперативного розрахункового визначення деформацій виробу під час друку [4]: за наближеним методом усадки (Mechanical inherent strain approach) у рамках механічної задачі теорії пружності або в результаті проведення більш загального зв'язаного аналізу термопластичного деформування матеріалу виробу в процесі друку при допущенні однакового спрощеного термічного циклу друку кожного вокселя.

Перший підхід оснований на визначенні функції усадки (залишкових пластичних деформацій) від друку окремого елементарного об'єму (вокселя) у залежності від технологічних параметрів пошарового формування виробу шляхом експериментального калібрування вказаних деформацій на стандартному надрукованому зразку типу балки обмеженого розміру. Кінетика нагріву виробу під час друку не розраховується, залишкові деформації і напруження визначаються в результаті розв'язку задачі механічного навантаження скінченно-елементної моделі виробу додатковими деформаціями усадки для кожного надрукованого вокселя, що дозволяє суттєво скоротити час розрахунку при збереженні достатньої з інженерної точки зору точності.

Другий розрахунковий підхід є більш загальним, він заснований на проведенні зв'язаного температурного та термомеханічного аналізу під час пошарового друку виробу. Але для скорочення часу на розрахунок використовується припущення про однаковий (спрощений) термічний цикл для кожного вокселя надрукованого матеріалу, що дозволяє не проводити аналіз задачі нестационарної теплопровідності для всієї моделі в процесі друку. У результаті розрахунку за цим підходом визначається приблизна кінетика нагріву, а також напружень і деформацій виробу.

З метою компенсації залишкових деформацій виробу можливий експорт моделі деформованої гео-

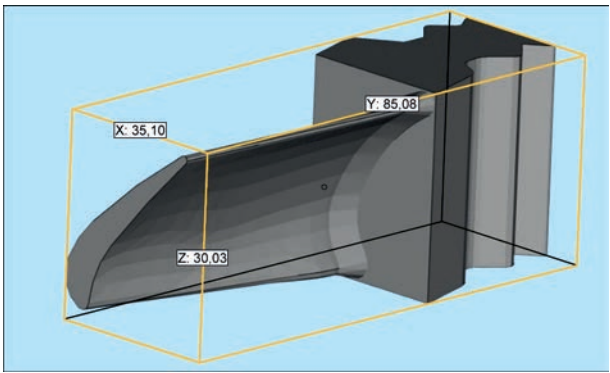


Рис. 1. Модель статорної лопатки ГТД

метрії з будь-яким масштабним множником. Таким чином, можна підібрати таку вихідну форму деталі, яка після процесу друку дає мінімальне відхилення від необхідної форми, компенсуючи деформації, які виникають при створенні цієї деталі [3].

Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive можливо визначити вплив технологічних параметрів друку на параметри кінцевого виробу та прогнозувати деформації форми деталі. У роботі була застосована модель лопатки газотурбінного двигуна (ГТД) (рис. 1).

З використанням програмного продукту Materialise Magics згенеровано технологічні опори для подальшого друку виробу. Були задіяні декілька просторових положень деталей, які надані на рис. 2.

Моделі рис. 2, а і рис. 2, б забезпечують найменший час побудови виробу в процесі друку. Модель рис. 2, в надає можливість розташувати на платформі принтера та надрукувати найбільшу кількість деталей за один виробничий цикл.

Файли моделей виробу та технологічних опор в форматі STL експортовані до програми Simufact Additive.

Подальші дії спрямовані на оптимізацію геометричної форми деталі та отримання інформації щодо впливу технологічних параметрів на формування виробів та їх властивості.

В інтерфейсі Simufact Additive створений проект, задані налаштування, де зазначені параметри устаткування і технологічного процесу, матеріали

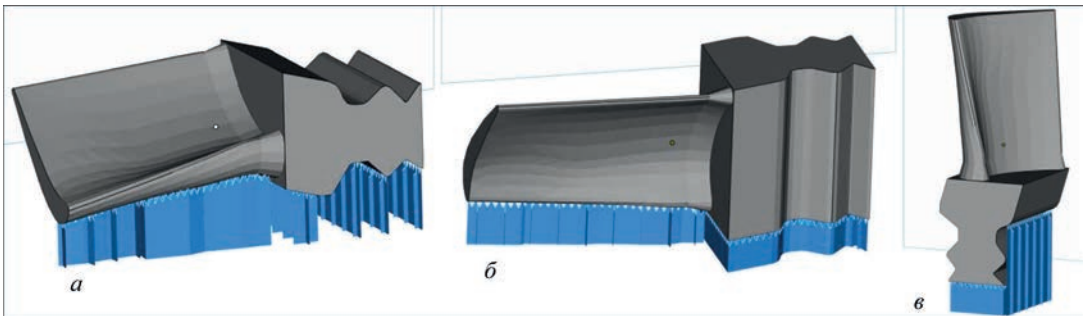


Рис. 2. Моделі виробу з технологічними опорами

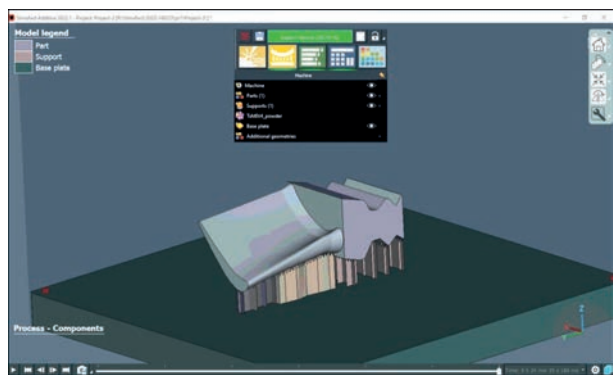


Рис. 3. Інтерфейс програми Simufact Additive з інтегрованою моделлю лопатки ГТД

деталі та платформи, імпортовані моделі виробу разом з технологічними опорами (рис. 3).

Технологічні параметри: потужність, швидкість і діаметр електронного променя, товщина шару порошку, метод сканування, термічні характеристики друку задані в налаштуваннях інтерфейсу у вкладниці Build-Propertes.

Надалі програмно згенеровано воксели – елементарні осередки, з яких складається модель виробу, що досліджується (рис. 4).

Наступним кроком проведено моделювання пошарового друку виробу. Графічний інтерфейс Simufact Additive, де відображено процес друку, наданий на рис. 5.

Деформації усадки визначались за іншим, більш загальним підходом до аналізу термопластичного деформування матеріалу. Тобто процеду-

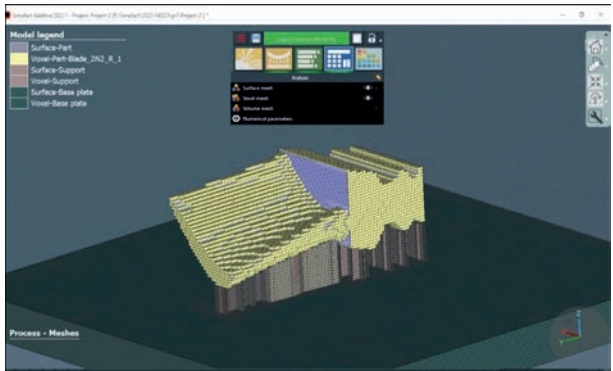


Рис. 4. Створення елементарних осередків – вокселів

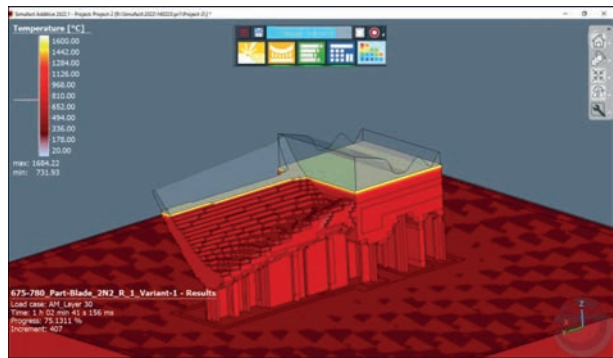


Рис. 5. Графічне відображення друку лопатки ГТД у програми Simufact Additive

ра калібрування деформацій усадки для вокселів матеріалу не проводилась, а виконувався аналіз кінетики температурної задачі нагріву виробу при пошаровому формуванні і зв'язаний термопластичний аналіз визначення напружено-деформованого стану.

Колір відповідає значенню температур виробу, технологічних опор та платформи на кожному з етапів симуляції друку. Кольорову палітру з показниками температури надано на рис. 5 у таблиці Temperature.

За результатами моделювання отримано файл (рис. 6), де обчислені відхилення розмірів лопатки ГТД від еталонної моделі. Відхилення розмірів виникають внаслідок деформації форми виробу в процесі друку. Значення можливих деформацій відповідають кольору та надані на палітрі в таблиці Total displacement.

Наступний етап досліджень – корегування моделі, обчислення просторових деформацій скоригованої моделі та її порівняння з еталонною моделлю.

Корегування моделі лопатки ГТД для компенсації просторових деформацій здійснюється в меню Shape comparison програми Simufact Additive. Модель, яка отримана за результатом симуляції адитивного процесу, порівнюється з еталонною моделлю. В інтерфейсі програми за кольоровою

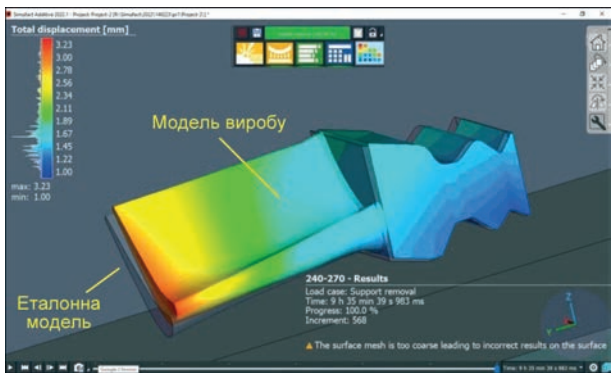


Рис. 6. Відхилення розмірів моделі надрукованого виробу від еталонної моделі

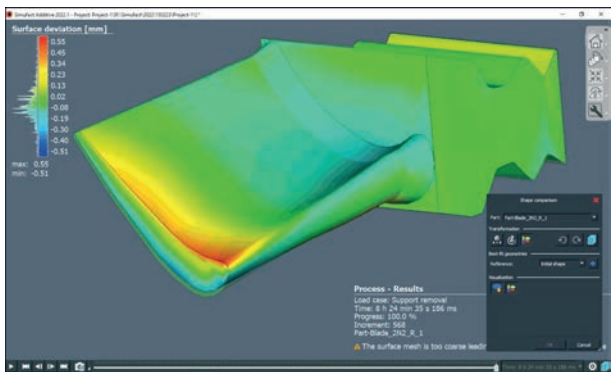


Рис. 7. Меню Shape comparison програми Simufact Additive

палітрою відображається відхилення розмірів скорегованої моделі від еталонної (рис. 7).

Надалі модель, що отримана, програмно обробляється. Створюється новий файл з урахуванням оптимізації форми. Процес симуляції друку послідовно повторюється. Створюється наступна модель лопатки ГТД, яка порівнюється з еталонною.

У разі невідповідності отриманої моделі еталонної в межах допусків, процес повторюється. Відхилення розмірів надрукованих виробів від еталонної моделі не має перевищувати $\pm 0,3$ мм.

Файл скорегованої моделі експортується в форматі stl та приймається для друку.

Порівнюючи еталону (базову) та оптимізовану моделі лопатки ГТД можна зазначити, що лінійні розміри остаточної моделі виробу збільшені від значень (35,1; 85,08; 30,03) мм за координатами X,Y,Z до значень (35,69; 85,378; 30,411) мм. Тобто модель збільшена з урахуванням компенсації усадкових явищ та інших чинників, які призводять до деформації форми виробу в процесі друку.

Вплив технологічних параметрів на форму виробів. У дослідженнях застосовано технологічні параметри друку виробів із порошків титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI, які визначені в [6] та наведені в табл. 1.

Для симуляції друку виробів, наданих на рис. 2, а, у програмі Simufact Additive створено три проекти з різними технологічними параметрами. У кожному проекті визначені просторові деформації та відхилення розмірів лопатки ГТД у

процесі друку, які відрізняються залежно від технологічних параметрів друку (табл. 2).

Просторові деформації для кожного із технологічних режимів є індивідуальними, тому потрібно провести дослідження друку кожного з виробів, наданих на рис. 2, для всіх режимів, зазначених в табл. 1. Потім провести корегування форми виробів і отримати остаточної моделі лопатки ГТД. Створені моделі будуть придатні для подальшого друку.

Оптимізація цифрових моделей лопатки ГТД. Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive отримано оптимізовані комп'ютерні моделі лопатки ГТД відповідно до застосованих технологічних режимів друку та просторового положення деталей. Результати моделювання надані в табл. 3.

Оптимізовані моделі збірки виробів у складі з технологічними опорами експортуються в форматі stl і придатні для подальшого друку.

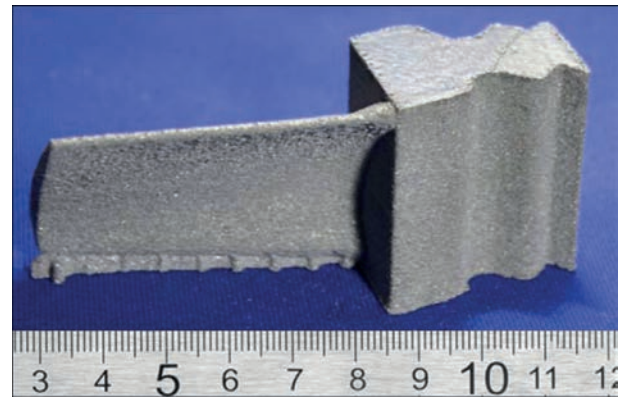


Рис. 8. Лопатка ГТД

Таблиця 1. Технологічні параметри друку виробів

Номер виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Зміщення траєкторії, мм	Товщина шару, мм	Густина енергії, Дж/мм ³
1	240	270	0,2	0,1	44,4
2	495	540	0,2	0,1	45,8
3	675	780	0,2	0,1	43,3

Таблиця 2. Значення просторових деформацій

Номер виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
			від	до
1	240	270	1,00	3,23
2	495	540	0,97	2,85
3	675	780	0,98	2,70

Таблиця 3. Результати оптимізації моделей лопатки ГТД

Номер виробу	Просторове положення за рис. 2	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
				від	до
1	а	240	270	-0,03	0,13
2	а	495	540	-0,02	0,08
3	а	675	780	-0,03	0,09
4	б	240	270	-0,05	0,11
5	в	240	270	-0,26	0,14
6	в	495	540	-0,25	0,14
7	в	675	780	-0,25	0,13

Таблиця 4. Розміри цифрової моделі та виробу «Лопатка ГТД»

Параметр	Цифрова модель, мм	Надрукований виріб, мм	Розбіжність, мм	Допуск, мм	Позначка про відповідність
Висота	35,1	35,21	0,11	±0,3	Відповідає
Ширина	30,03	30,16	0,13	±0,3	Відповідає
Довжина	85,08	85,06	-0,02	±0,3	Відповідає

Виготовлення та дослідження геометрії лопатки ГТД. За оптимізованою комп’ютерною моделлю (рис. 2, б) відповідно до заданих технологічних параметрів (табл. 1, виріб № 2) методом адитивного електронно-променевого наплавлення виготовлено лопатки ГТД (рис. 8).

Проведено аналіз формоутворення виробу. Геометричні розміри еталонної комп’ютерної моделі та надрукованого виробу «Лопатка ГТД» надані в табл. 4.

Визначено, що за розмірами надрукована лопатка ГТД відповідає цифровій моделі. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу $\pm 0,3$ мм.

Висновки

У межах технологічної підготовки до адитивного виробництва дослідних зразків робочих лопаток ГТД проведено комп’ютерну симуляцію друку із застосуванням програмного продукту Simufact Additive і порівняння отриманих результатів з еталонною моделлю. Отримано оптимізовані комп’ютерні моделі лопатки ГТД з ураху-

ванням просторових деформацій, які виникають в процесі друку. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу $\pm 0,3$ мм.

Список літератури/References

1. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, **3**, 7–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02>

2. Sahini, D.K., Ghose, J., Jha, S.K., Behera, A., Mandal, A. (2020) Optimization and simulation of additive manufacturing processes: challenges and opportunities – A review. In book: *Additive Manufacturing Applications for Metals and Composites*, 187–209. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4054-1.ch010>

3. Derrer, J.P. et al. (2022) Simufact engineering provides the green team & renishaw with a complete AM process simulation solution. *SIMUFACT Case study*. https://enteknograte.com/wp-content/uploads/2022/06/hexagon_mi_simufact_casestudy_renishaw_a4_en_screen.pdf

4. *Simufact additive*. <https://hexagon.com/products/simufact-additive>.

5. *MSC. Marc volume A: Theory and user information*. <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/msc-marc-volume-a--theory-and-user-information-doc9245>.

6. Matviichuk, V., Nesterenkov, V., Berdnikova, O. (2022) Determining the influence of technological parameters of the electron-beam surfacing process on quality indicators. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **1**, 21–30. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253473>

COMPENSATION OF SPATIAL DEFORMATION OF PARTS
AT ADDITIVE ELECTRON-BEAM SURFACING

V.A. Matviichuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych St., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: matviychuk@technobeam.com.ua

The aim of the work is to analyze and optimize the shaping of a GTD blade in the process of manufacturing using additive electron beam technology. Using the method of computer simulation in the Simufact Additive software, the influence of technological parameters of printing on the product shaping was investigated, and the shrinkage phenomena that occur during the printing process were analyzed. Printing simulation was performed and the results were compared with the reference model. The optimized computer models of GTD blades were created. According to the calculation results, when using the optimized models, the deviation of the geometric dimensions of the printed blades does not exceed the product size tolerances of ± 0.3 mm. 6 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: additive technologies, electron beam, surfacing, simulation, shaping, 3D printer

Отримано 12.06.2024
Отримано у переглянutoму вигляді 14.10.2024
Прийнято 26.11.2024

НОВА КНИГА

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. *Аргонодугове та електронно-променеве зварювання економно-легованих титанових сплавів*. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2024. — 136 с. ISBN 978-617-7785-64-3. Формат 145x200 мм, м'яка обкладинка.

Книгу можна замовити в редакції журналу «Автоматичне зварювання».