

УДК 621.791.75:621.9.04:004.94

Василь Васильків, д.т.н., проф.; Назарій Маковинський; Олександр Корнєв
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ГВИНТОВИХ ВИРОБІВ, СИНТЕЗОВАНИХ МЕТОДАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ

Анотація. У роботі досліджено технологічні особливості використання сучасних адитивних технологій при виготовленні деталей типу шнеків складної геометрії, отриманих за результатами реалізації методики генеративного дизайну відповідно до умов експлуатації та характеру силових факторів, прикладених до витків. Показано, що класичні технології формоутворення гвинтових поверхонь мають суттєві обмеження при виготовленні полегшених багатопорожнинних конструкцій із локально змінною жорсткістю та змінним законом розподілу товщини витка. Встановлено раціональні умови використання технологій SLM, EBM, WAAM, SLS та FDM для виготовлення шнекових виробів із функціонально-градієнтною структурою. Запропоновано підхід до інтеграції результатів топологічної оптимізації та генеративного проєктування з адитивним виробництвом шнеків. Показано, що використання генеративного дизайну дозволяє формувати структури витків із мінімізованою масою при забезпеченні необхідної жорсткості, а застосування адитивних технологій забезпечує можливість їх практичної реалізації без технологічних обмежень традиційних способів формоутворення.

Ключові слова: шнек, гвинтова поверхня, генеративний дизайн, адитивне виробництво, SLM, WAAM, топологічна оптимізація, функціонально-градієнтна структура.

Vasyl Vasylykiv, Nazarii Makovynskyi, Oleksandr Korniev

FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF AUGER TYPE PARTS SYNTHESIZED BY GENERATIVE DESIGN METHODS

Abstract. This paper investigates the technological features of applying modern additive manufacturing technologies to the production of screw products with complex geometry obtained through the implementation of a generative design methodology in accordance with operating conditions and the nature of force factors acting on the flights. It is shown that conventional technologies for forming helical surfaces have significant limitations in the manufacture of lightweight multi-cavity structures with locally variable stiffness and a non-uniform flight thickness distribution law. Rational conditions for the application of SLM, EBM, WAAM, SLS, and FDM technologies in the fabrication of auger type parts with a functionally graded structure have been determined. An approach for integrating the results of topology optimization and generative design with additive manufacturing of screw components is proposed. It is demonstrated that the use of generative design enables the creation of flight structures with minimized mass while ensuring the required stiffness, whereas additive manufacturing technologies provide the possibility of their practical implementation without the technological limitations inherent in traditional forming methods. Keywords: auger, helical surface, generative design, additive manufacturing, SLM, WAAM, topology optimization, functionally graded structure.

Сучасні тенденції розвитку транспортуючих, змішувальних, дозувальних і ґрунтообробних машин обумовлюють необхідність створення деталей типу шнеків із

високою питомою міцністю, адаптивною жорсткістю та мінімізованою масою. Особливо актуальною ця проблема є для гвинтових виробів великого діаметра, що працюють в умовах змінних осьових і крутних навантажень, циклічного абразивного спрацювання та динамічної невідповідності.

Традиційні технології виготовлення таких виробів – навивання стрічки ребром, штампування секторів, лиття або механічне формоутворення – орієнтовані переважно на геометрично регулярні конструкції із постійною та суцільною товщиною витка. Такі методи практично непридатні для реалізації виробів, отриманих за результатами генеративного проектування, де геометрія витка формується відповідно до реального розподілу напружень і силових потоків.

У сучасних CAD/CAE-системах генеративний дизайн дозволяє створювати конструкції гвинтових виробів із:

- локально змінною товщиною витка;
- внутрішніми гратчастими або комірчастими структурами;
- криволінійними каналами охолодження;
- адаптивними ребрами жорсткості;
- функціонально-градієнтним розподілом матеріалу.

Реалізація таких конструкцій традиційними методами практично неможлива або економічно недоцільна. Саме тому адитивні технології стають не допоміжним, а базовим способом виробництва шнекових виробів нового покоління.

Аналіз сучасного стану досліджень. За останні 5–7 років найбільш інтенсивний розвиток у виробництві металевих шнекових елементів отримали технології: SLM (Selective Laser Melting); LPBF (Laser Powder Bed Fusion); EBM (Electron Beam Melting); WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing); DED (Directed Energy Deposition).

Для виготовлення навантажених гвинтових виробів особливий інтерес становлять сплави: 316L; Inconel 718; AlSi10Mg; Ti6Al4V; мартенситностаріючі сталі типу Maraging M300.

Сучасні дослідження Fraunhofer ILT (Німеччина), Oak Ridge National Laboratory (США) та University of Nottingham показують, що при використанні LPBF можливо отримувати тонкостінні спіральні елементи товщиною 0,4–0,8 мм із відносною густиною понад 99,2 % та границею міцності до 1180 МПа для сталей типу Maraging.

Особливо перспективною для великогабаритних шнеків є технологія WAAM, продуктивність якої досягає 6–9 кг/год, що у 15–25 разів перевищує продуктивність SLM. При цьому забезпечується формування багат шарових функціонально-градієнтних структур із локальним підсиленням зон концентрації напружень.

Однак головною проблемою при адитивному формоутворенні деталей з гвинтовими поверхнями залишається прогин тонких витків, термічні деформації, залишкові напруження, анізотропія механічних властивостей та нестабільність геометрії при великій висоті витка.

Ці явища особливо проявляються при друці консольних ділянок витків із малим кутом нахилу до площини побудови.

Тому метою роботи є дослідження особливостей використання сучасних адитивних технологій для виготовлення гвинтових виробів, синтезованих методами генеративного дизайну відповідно до реальних умов експлуатації та дії силових факторів на витки.

Генеративний дизайн шнеків. На відміну від класичного параметричного проектування, генеративний дизайн формує геометрію шнека не за наперед заданою формою, а на основі граничних умов, прикладених навантажень, зон допустимого розміщення матеріалу, критеріїв мінімізації маси та обмежень жорсткості та довговічності.

При цьому розподіл товщини витка визначається не конструктивними міркуваннями, а величинами осьових сил, крутних моментів, контактних тисків, локальних згинальних напружень.

У результаті генеративної оптимізації формуються конструкції із змінною товщиною витка, біонічними ребрами жорсткості, внутрішніми порожнинами та багаторівневими комірчастими структурами (рис. 1).

Такі конструкції дозволяють знизити масу шнека на 28–47 % при одночасному підвищенні питомої жорсткості.

Технологічні особливості адитивного виготовлення. Для шнекових виробів найбільш критичним параметром є співвідношення:

$$\lambda = LzD^{-1},$$

де Lz – осьова довжина шнека; D – зовнішній діаметр витка.

При $\lambda > 6$ суттєво зростає ймовірність термічного викривлення та втрати точності кроку спіралі.

Для тонкостінних витків визначальним є також параметр консольності яким є питома висота витка $b = Bh^{-1}$ (B - висота витка; h - товщина витка).

За умови $b > 18$ у процесі SLM спостерігається локальна втрата стійкості через накопичення залишкових термічних деформацій.

Встановлено, що найбільш ефективними є такі схеми побудови:

- вертикальне формування шнека із сегментацією по висоті;
- друк секторальних модулів із подальшим дифузійним з'єднанням;
- комбінована схема WAAM + механічне фрезерування;
- друк витків на попередньо виготовленому валу.

Останній варіант є особливо перспективним для великогабаритних комбінованих гвинтових виробів.

Особливості структури матеріалу. Для адитивно виготовлених витків шнеків характерна виражена анізотропія властивостей. При SLM границя текучості вздовж шарів може бути на 18–27 % нижчою, ніж у поперечному напрямку.

Тому орієнтацію шнека в камері побудови необхідно узгоджувати із напрямками основних експлуатаційних навантажень.

Для гвинтових виробів транспортуючих систем найбільш раціональною є орієнтація, при якій траєкторії наплавлення збігаються із напрямком головних дотичних напружень.

Сучасні дослідження показують, що використання комірчастих структур типу Gyroid дозволяє зменшити масу витка до 35 %, підвищити демпфувальні властивості, знизити рівень вібрацій, а також покращити умови тепловідведення.

Перспективи інтеграції генеративного дизайну та АМ-технологій. Поєднання генеративного дизайну та адитивного виробництва формує принципово новий підхід до створення гвинтових виробів.

У такому випадку на основі CAE-аналізу визначаються реальні силові потоки, формується оптимізована топологія витка, створюється функціонально-градієнтна структура та здійснюється безпосереднє виготовлення виробу адитивним методом.

Це дозволяє перейти від концепції «виготовлення геометрії» до концепції «виращування функціональної структури».

Особливо перспективним є використання multi-material АМ, коли периферійна



Рисунок 1 – Конструкція шнека, яка синтезована з використанням методу генеративного дизайну на основі урахування впливу на нього силового фактору у вигляді крутного моменту

зона витка формується із зносостійких матеріалів, а внутрішній об'єм – із легших енергопоглинаючих структур.

Встановлено, що адитивні технології є найбільш ефективним способом виготовлення деталей типу шнеків, синтезованих методами генеративного дизайну.

Показано, що результати генеративного проектування формують конструкції зі змінною геометрією витків, які практично неможливо реалізувати традиційними методами формоутворення.

Визначено, що для тонкостінних шнекових елементів основними обмежувальними факторами є прогин витків, термічні деформації, залишкові напруження та анізотропія властивостей.

Найбільш перспективними для виготовлення шнекових виробів є технології SLM, WAAM та LPBF, які забезпечують реалізацію функціонально-градієнтних структур і внутрішніх порожнин.

Інтеграція генеративного дизайну з адитивним виробництвом дозволяє зменшити масу шнекових виробів до 40–50 % при одночасному забезпеченні необхідної жорсткості та довговічності.

Перелік посилань

1. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації. – Львів, 2015. – 48 с.
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
3. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.07.019](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019).
4. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. – 3rd ed. – Springer, 2021. – 670 p. ISBN: 978-3-030-56127-7. DOI: [10.1007/978-3-030-56127-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7).
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.02.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012).
6. Cunningham R., Zhao C., Parab N., Kantzos C., Pauza J., Fezzaa K., Sun T., Rollett A.D. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging // Science. – 2019. – Vol. 363(6429). – P. 849–852. DOI: [10.1126/science.aav4687](https://doi.org/10.1126/science.aav4687).
7. Vaneker T., Bernard A., Moroni G., Gibson I., Zhang Y. Design for additive manufacturing: Framework and methodology // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69(2). – P. 578–599. DOI: [10.1016/j.cirp.2020.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006).
8. Gu D. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. – Springer, 2021. – 512 p. DOI: [10.1007/978-3-662-46089-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4).
9. ASTM International. ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – West Conshohocken, PA, USA, 2023.
10. Wei H.L., Mukherjee T., Zhang W. et al. Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components // Progress in Materials Science. – 2021. – Vol. 116. – P. 100703. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2020.100703](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100703).
11. DebRoy T., Mukherjee T., Wei H.L. et al. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing // Nature Reviews Materials. – 2021. – Vol. 6. – P. 48–68. DOI: [10.1038/s41578-020-00236-1](https://doi.org/10.1038/s41578-020-00236-1).