



Universitatea Tehnică a Moldovei

**Cercetarea preciziei tehnologiilor aditive aplicate pieselor
cu profile complexe**

Teză de master

Ingineria Produsului și a procesului în Construcții de Mașini

Student:

ZUBAC Vadim

Coordonator:

**TOCA Alexei, prof.
univ., dr.**

Chișinău, 2026

Continut	pag
Introducere	6
2. Tehnologii aditive (de imprimare 3D) disponibile	9
3. ANALIZA PRECIZIEI TEHNOLOGIILOR ADITIVE PENTRU FABRICAREA PIESELOR	14
4 Studiu de caz 1 Cercetarea preciziei dimensionale pe directia de depunere in functie de inghiurile de atac la intrare si la iesire	22
2.2. Studiu de caz2. Imprimarea rotorului rotii de lucru a pompei centrifuge	29
2.3. Studiu de caz 3. Roata dintata	30
Concluzii	35
Bibliografii	37

Rezumatul

Zubac Vadim. Cercetarea preciziei tehnologiilor aditive aplicate pieselor cu profile complexe. Universitatea tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, Departamentul Ingineria Fabricației, 2025. Teză de master: pag.- 68, figuri -94, surse bibliografice – 52.

În lucrarea curentă este descris procesul de proiectare și fabricației a unei piese complexe cu ajutorul tehnologiilor aditive. Designul incorect poate duce fie la defecte în timpul procesului de fabricație, fie la eșecul piesei finale. Tehnologiile aditive au limitări și în ceea ce privește toleranțele geometrice și calitatea suprafeței, motiv pentru care este adesea necesară post-procesarea pentru a respecta cerințele de proiectare, spre exemplu un corp rotund, trebuie de decis cum îl proiectăm și poziționăm în comparație cu axa z. Putem corpul rotund întreg sau îl tăiem în jumătate și îl poziționăm pe axa z și facem o rezoluție mai bună încât să influențăm calitatea suprafeței, neuitând de elementele de conexiune între ele.

Cuvinte-cheie: proiectare, fabricare, tehnologii aditive, calitate, control, proces.

Abstract

ZUBAC Vadim. Research into the precision of additive technologies applied to parts with complex profiles. Technical University of Moldova, Faculty of Mechanical, Industrial and Transport Engineering, Department of Manufacturing Engineering, 2025. Master's thesis: p.- 68, figures -94, bibliographic sources – 52.

The current work describes the process of designing and manufacturing a complex part using additive technologies. Incorrect design can lead either to defects during the manufacturing process or to the failure of the final part. Additive technologies also have limitations in terms of geometric tolerances and surface quality, which is why post-processing is often necessary to meet the design requirements, for example a round body, we need to decide how to design and position it compared to the z-axis. We can design the entire round body or cut it in half and position it on the z-axis and make a better resolution so as to influence the surface quality. not forgetting the connection elements between them.

Keywords: design, manufacturing, additive technologies, quality, control, process.

1. INTRODUCERE.

În orice proces de proiectare, inginerii trebuie să conceapă un component care să îndeplinească condițiile funcționale ale clientului, să fie de calitate înaltă și să poată fi fabricat într-un mod rentabil din punct de vedere al costurilor. Ca parte a acestui proces, proiectantul trebuie să aleagă tehnologia de fabricație care va fi folosită, deoarece fiecare tehnologie are propriile limitări, care afectează direct forma finală a produsului.

Odată ce tehnologia de fabricație este aleasă, trebuie ca proiectantul să dezvolte un produs care să respecte cerințele funcționale, de cost și de calitate, dar în același timp să evite acele caracteristici de design care pot duce la defecte frecvente acestei tehnologii respective. A fost amintit faptul că nu toate piesele funcționale sunt potrivite pentru fabricația aditivă, iar hotărârea de a utiliza această tehnologie trebuie luată încă din începutul de proiectare.

În fabricația tradițională, există anumite reguli de proiectare care trebuie respectate, dar și caracteristici care trebuie evitate atunci când se proiectează pentru fabricația aditivă (DFAM – Design for Additive Manufacturing). Important este alegerea tipului de tehnologie aditivă, deoarece diferitele tehnologii prezintă limitări diferite privind tensiunile reziduale, grosimea minimă a pereților, necesitatea structurilor de suport și nivelul de umplere interioară cu structuri.

Grosimea stratului (rezoluția pe axa Z) trebuie definită încă din faza de proiectare, existând un compromis între timpul de fabricație și calitatea suprafeței. În funcție de tehnologia aditivă aleasă, trebuie cercetată necesitatea și poziționarea structurilor de suport, precum și orientarea piesei, deoarece acestea influențează cheltuielile de producție, post-procesarea, aspectul piesei și capacitățile sale mecanice. Trebuie acordată o atenție deosebită caracteristicilor de design precum: suporturile (overhangs), elementele nesuținute, găurile mici sau orizontale, pereții subțiri, cavitățile interne. Designul incorect poate duce fie la defecte în timpul procesului de fabricație, fie la eșecul piesei finale. Tehnologiile aditive au limitări și în ceea ce privește toleranțele geometrice și calitatea suprafeței, motiv pentru care este adesea necesară post-procesarea pentru a respecta cerințele de proiectare, spre exemplu un corp rotund, trebuie de decis cum îl proiectăm și poziționăm în comparație cu axa Z. Putem corpul rotund întreg sau îl tăiem în jumătate și îl poziționăm pe axa Z și facem o rezoluție mai bună încât să influențăm calitatea suprafeței, neuitând de elementele de conexiune între ele.

Alegerea tehnologiei aditive

În cadrul DFAM (Design for Additive Manufacturing) alegerea tehnologiei de fabricație aditivă este o decizie esențială. Există mai multe tehnologii disponibile, fiecare cu avantaje și dezavantaje specifice. Alegerea poate fi influențată de criterii precum costul (material, energie, echipamente), tipul de material, calitatea suprafeței sau precizia geometrică.

De exemplu:

✓ FFF (Fused Filament Fabrication) este o tehnologie accesibilă ca preț, dar cu o calitate mai slabă a suprafeței și o precizie geometrică mai redusă în comparație cu stereolitografie.

✓ SLA (Stereolithography) permite obținerea unor suprafețe foarte netede și chiar piese transparente, însă materialele utilizate sunt fragile și nu sunt potrivite pentru piese supuse solicitărilor mecanice, și socurilor termice.

✓ SLS (Selective Laser Sintering) permite fabricarea unor piese rezistente din poliamidă, fără structuri de support, dar pulberea poate rămâne blocată în cavitățile interne, pentru înlăturarea acestora trebuie proiectate gauri pentru evacuare, iar costurile echipamentelor sunt mai ridicate. Proiectantul trebuie să analizeze ce cerințe sunt minim stric necesare pentru piesă și să aleagă tehnologia care oferă cea mai bună alegere între performanță și cost.

Alegerea materialului

Alegerea materialului este necesar în orice proces de proiectare. Materialul ales trebuie să satisfacă cerințele funcționale, mecanice, estetice și economice ale proiectului. Pentru aplicații simple, cu solicitări mecanice reduse, PLA sau ABS fabricate prin FFF (Fused Filament Fabrication) sunt soluții ieftine și eficiente. Pentru aplicații cu solicitări medii (30–85 MPa), sunt o alegere bună piesele din nylon realizate prin SLS (Selective Laser Sintering). Pentru aplicații cu solicitări mari, sunt necesare piese metalice fabricate prin DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Pentru aplicații medicale, cum ar fi implanturile, sunt necesare materiale biocompatibile, precum aliajele de titan (Ti-6Al-4V).

Dacă se dorește transparență sau o calitate foarte bună a suprafeței, este recomandată tehnologia SLA (Stereolithography).

Alegerea materialului trebuie realizată individual pentru fiecare aplicație, în funcție de cerințele principale ale clientului.

Grosimea stratului (Layer Height)

Grosimea stratului influențează direct calitatea suprafeței. O grosime mare a stratului duce la un efect de „scară” mai pronunțat pe suprafețele curbe și înclinate. Pe măsură ce grosimea stratului scade, suprafața devine mai netedă, însă timpul de fabricație crește. Reducerea la jumătate a grosimii stratului duce, aproximativ, la dublarea timpului de imprimare. Din acest motiv, există un compromis clar între calitatea suprafeței și durata procesului. În multe cazuri, pentru obținerea unor suprafețe foarte netede, este necesară post-procesarea (șlefuire, frezare, lustruire).

Structurile de suport.

Structurile de suport sunt necesare în tehnologiile FFF, SLA și DMLS, dar nu și în SLS pentru materiale polimerice. Ele au rolul de:

1. susținere a consolelor,
2. fixare a piesei pe platforma de construcție,

3. disipare a căldurii (în special în DMLS).

Materialul de suport este considerat material pierdut, deoarece este îndepărtat după fabricație. Din acest motiv, proiectarea suporturilor trebuie făcută cu grijă, folosind cât mai puțin material, dar asigurând stabilitatea piesei. Suporturile trebuie evitate pe pereți subțiri sau pe suprafețe vizibile, deoarece îndepărtarea lor poate deteriora suprafața piesei și poate necesita post-procesări suplimentare.

Orientarea piesei în timpul imprimării

Orientarea piesei influențează:

1. necesarul de suporturi,
2. timpul de fabricație,
3. proprietățile mecanice,
4. numărul de piese care pot fi fabricate simultan.

În general, piesele sunt mai rezistente în planul X–Y decât pe direcția Z. De aceea, piesa trebuie orientată astfel încât direcția solicitării maxime să fie cât mai apropiată de planul X–Y.

Console și elemente nesustinite

Tehnologiile FFF, SLA și DMLS necesită suport pentru console. De regulă:

1. până la un unghi de 45°, suporturile sunt necesare;
2. peste 45°, în unele cazuri (FFF), suporturile pot fi eliminate.

Podurile orizontale pot fi realizate fără suport până la aproximativ 10 mm în FFF, însă calitatea suprafeței inferioare este redusă. În DMLS, lungimea maximă recomandată este de aproximativ 2 mm.

Finisarea suprafeței și îmbunătățirea toleranțelor

Finisarea suprafeței este un pas important. Calitatea suprafeței depinde de:

1. tehnologia utilizată,
2. grosimea stratului,
3. poziționarea suporturilor.

Pentru îmbunătățirea toleranțelor geometrice se pot folosi:

1. prelucrări CNC,
2. sablare,
3. lustruire vibrațională,
4. finisare cu laser.

În cazul prelucrărilor mecanice, piesele trebuie proiectate ușor supradimensionate pentru a permite îndepărtarea materialului.

Sablarea poate îmbunătăți aspectul suprafeței, dar poate rotunji muchiile și afecta detaliile fine. Lustruirea vibrațională reduce rugozitatea, dar trebuie aplicată cu atenție în cazul pieselor cu geometrii complexe.

Bibliografie

1. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2015
2. ISO/ASTM 52900:2021 – Additive manufacturing General principles Fundamentals and vocabulary.
3. Townsend, A. et al., “Surface texture metrology for metal additive manufacturing”, Precision Engineering, Elsevier, 2016.
4. Litvin, F. L., Fuentes, A., Gear Geometry and Applied Theory, Cambridge University Press, 2004.
5. Budzik, G., et al., “Accuracy of gears manufactured by additive manufacturing methods”, Journal of Manufacturing Processes, 2019.
6. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Springer, 2015
7. Gebhardt, A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing Hanser Publishers, 2012
8. 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
9. Boschetto, A., Giordano, V., Veniali, F. “Surface roughness and accuracy improvement of FDM parts through build orientation optimization” Journal of Manufacturing Processes, 2013
10. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K. “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS” Rapid Prototyping Journal, 2002
11. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P. J. “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties” Materials & Design, 2017
12. Dudley, D. W. Handbook of Practical Gear Design and Manufacture CRC Press
13. Litvin, F. L., Fuentes, A. Gear Geometry and Applied Theory, Cambridge University Press, 2004
14. Vaezi, M., Seitz, H., Yang, S. “A review on 3D micro-additive manufacturing technologies” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013.
15. Volodymyr KUKHAR, Elena BALALAYEVA, Hlib KHLIESTOV, Olha KHLIESTOVA. Analysis of technological regimes of open-die forging with model development for digital systems of metallurgical production. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 88, Iss. 2, 2026. Pp. 227-240. ISSN 1454-2358.
16. Volodymyr V. Kukhar, Khrystyna V. Malii, Natalia S. Hrudkina and Eleonora O. Butenko. Identification of Early Degradation Mechanisms in Zinc Coating on Cold-Formed Steel Sections Through Analysis of the Production–Storage Chain. The International Conference on Advanced

- Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2025), October 20–21, 2025, Kharkiv, Ukraine. pp. 179-189. ISSN 2195-4364. <https://doi.org/10.1007/978-3-032-16381-3>.
17. Volodymyr Kukhar, Andrii Kostryzhev, Oleksandr Dykha, Oleg Makovkin, Ihor Kuziev, Roman Vakulenko, Viktoriia Kulynych, Khrystyna Malii, Eleonora Butenko, Natalia Hrudkina, Oleksandr Shapoval, and Oleksandr Hrushko. Technological and Chemical Drivers of Zinc Coating Degradation in DX51d+Z140 Cold-Formed Steel Sections. *Journals Metals*. Volume 16 issue 2, 37 p., 2026. <https://doi.org/10.3390/met16020146>.
18. Mihail BÎCIOC, Sergiu MAZURU. Practical aspects regarding optimization of three axis CNC machining. *Materials Research Proceedings*. Volume 61. Pages 58-66. <https://doi.org/10.21741/9781644903995-8>.
19. Valeriu Dulgheru, Radu Ciobanu, Oleg Ciobanu, Iulian Malcoci, Sergiu Mazuru, Nicolae Trifan, Dumitru Vengher. Planetary Precessional Transmission: Geometry and Contact Bearing Capacity. *Jurnal Countering Hybrid Threats Against Critical Infrastructures*. 2025.
20. Ion Bostan, Viorel Bostan, Maxim Vaculenco, Ion Bodnariuc, Sergiu Mazuru, Valeriu Dulgheru, Radu Ciobanu, Oleg Ciobanu, Iulian Malcoci, Nicolae Trifan, Dumitru Vengher, Alina Bregnova. Planetary precessional transmission: geometry and contact bearing capacity, kinematics and profile generation. Book *The International Conference on Strategic Innovative Marketing and Tourism*. Springer Netherlands. Pp. 275-355.. 2024.
20. Mazuru Sergiu. Metode și procedee de fabricare aditivă. Editura Tehnica-UTM, ISBN: 978-9975-45-741-5, 2021, 144 p.
21. BOSTAN Viorel, BOSTAN Ion, MAZURU Sergiu, VACULENCO Maxim, LEALIN Stanislav, BREGNOVA Alina. Precessional planetary transmissions. Brevet de invenție B.I. 4910. BOPI nr. 12/2024.
21. BOSTAN Viorel, BOSTAN Ion, MAZURU Sergiu, VACULENCO Maxim. Precessional planetary transmissions. Brevet de invenție B.I. 4911. BOPI nr. 12/2024.
22. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M. “Industry 4.0” *Business & Information Systems Engineering*, 2014
23. Lu, Y. “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues” *Journal of Industrial Information Integration*, 2017
24. Gibson, Rosen, Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2015.
25. Kagermann, Wahlster, Helbig, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, 2013.

26. APPLICATION OF FSI SIMULATIONS IN THE OPTIMISATION CYCLE OF CENTRIFUGAL PUMP IMPELLERS. 1 Technical University of Moldova, 168 Stefan cel Mare Blvd., Chisinau, MD 2004, Republic of Moldova S.R.L. "CRIS" 68/2-69 Albisoara str., Chisinau, MD-2005, Republic of Moldova, 2025
27. Alvarez, B.J., Blanco, D., Noriega, A., Fernandez, P. și Beltran, N., Influence of sampling strategies upon accuracy when measuring PolyJet parts, Lecture Notes in Engineering and Computer Science, pp. 1127–1132, ISSN 2078-0958, 2014.
28. CUSTOMPART.NET, Fused Deposition Modeling (FDM) [online]. [citat 04.05.2016]. Disponibil la: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-depositionmodeling>
29. ABS-P400 Material Data Sheet: Dimension 3D Printers, Stratasys, SUA, 2011.
30. Frkal, M., Design of calibration standard for determining measurement accuracy of optical 3D scanners, Liberec, 2016, teză de diplomă, Universitatea Tehnică din Liberec, Facultatea de Inginerie Mecanică (în limba cehă).
31. GOM mbH, ATOS V7 – Hardware – User Manual, Braunschweig, Germania, 2012.
32. GOM mbH, GOM Acceptance Test (Certificate): Acceptance/Reverification According to VDI/VDE 2634, Part 3, Braunschweig, Germania, 2012.
33. Ilčík, J. et al., Geometrical Accuracy of the Metal Parts Produced by Selective Laser Melting: Initial Tests, în Modern Methods of Construction Design, Springer, Elveția, 2014, pp. 573–582.
34. Królikowski, M. și Filipowicz, K., Verification of geometrical accuracy of Selective Laser Melting (SLM) built model, Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 37, nr. 3, Polonia, 2013.
28. Lee, K. et al., Accuracy of three-dimensional printing for manufacturing replica teeth, Korean Journal of Orthodontics, vol. 45, nr. 5, pp. 217–225, 2015.
35. Coifu, Iu., Nițulenco, T., Bolunduț, I.-L., Toca, A. Studiul și Ingineria Materialelor (materiale nemetalice). Sticla. Chisinau, Editura UTM, 2014, 256 pag. ISBN 978-9975-45-301-1. <http://repository.utm.md/handle/5014/23651>
36. Coifu, Iu., Nițulenco, T., Bolunduț, I.-L., Toca, A. Studiul și Ingineria Materialele (materiale metalice). Chișinău U.T.M., 2012. -467 p. ISBN 978-9975-45-261-8. <http://repository.utm.md/handle/5014/15857>
37. Coifu, Iu., Nițulenco, T., Bolunduț, I.-L., Toca, A. *Simbolizarea materialelor metalice în sistemele de standarde GOST (Rusia), STAS (România) și EN (Uniunea Europeană)*. Editura TEHNICA UTM, Chișinău, 2013. - 256 p. ISBN 978-9975-45-261-8. <http://repository.utm.md/handle/5014/15775>
38. Toca, A., Nitulenco T., Ciuperca R. Analiza sistemică și funcțională. Chișinău U.T.M., 2022. -280 p. ISBN 978-9975-45-767-5. <http://repository.utm.md/handle/5014/19384>

39. Bregnova A, Crăciun E., Hrițuc A. ,Andrușcă L., Toca A., Dodun O., Slătineanu L. Bending Behavior of an Anisotropic Composite Polymeric Material Part. *Macromol. Symp.* 2025, 414, 70046. DOI: 10.1002/masy.70046
40. Iatchevici, V.; Toca, A.; Nitulenco, T., Stroncea, A. Technological transfer under the conditions of digitalization of products and processes. *Journal of Engineering Science*, 2023, 30 (4), pp. 31-44. [doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(4\).03](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(4).03)
41. Slatineanu, L., Coteata, M., Dodun, O., Toca, A. Ideas diagram in creative design. *In proceedings of the First International Conference on Axiomatic Design (ICAD 2009)*. At: Campus de Caparica – Portugal, , pp. 79 – 84. ISBN 978-989-20-1535-4
42. Levínská, B., Accuracy Analysis Manufacturing a Component of Rapid Prototyping, Liberec, 2015, teză, Universitatea Tehnică din Liberec.
43. Melenka, G.W. et al., Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, nr. 5, pp. 618–627, 2015.
44. Mendricky, R. și Keller, P., Precision Analysis of Part Manufacturing Using SLM Method, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 693, pp. 183–188, 2014.
45. OBJET, Connex 500: The First Multi-material 3-Dimensional Printing System, 2011.
46. PROTO3000, PolyJet Matrix 3D Printing Services Process [online], 2013. Disponibil la: <http://proto3000.com/polyjet-matrix-3d-printing-services-process.php>
47. Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, Improving dimensional accuracy of FDM processed parts using grey Taguchi method, *Materials and Design*, vol. 30, nr. 10, pp. 4243–4252, 2009.
48. STRATASYS, Dimension BST 768, SST 768 and Elite User Guide, SUA, 2007.
49. PolyJet Materials Data Sheet [online], SUA, 2016. Disponibil la: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet>
50. Šafka, J. et al., Shape and Size Accuracy of 3D-printed AlSi12 Parts, *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 21, nr. 4, pp. 278–284, 2015.
51. JAVGUREANU, Vasile, GORDELENCO, Pavel. Some elastoplastically deformation and failure composite iron - nickel coatings. In: *Meridian Ingineresc.* 2013, nr. 4, pp. 78-81. ISSN 1683-853X. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/29743
52. JAVGUREANU, Vasile, GORDELENCO, Pavel. Study of physical and mechanical properties of iron-nickel composite coatings macro indentation. In: *Meridian Ingineresc.* 2013, nr. 4, pp. 41-45. ISSN 1683-853X. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/29745