



Digitally signed by
Library TUM
Reason: I attest to the
accuracy and integrity
of this document

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

METODE ȘI PROCEDEE DE FABRICARE ADITIVĂ

NOTE DE CURS



**Chișinău
2021**

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
FACULTATEA INGINERIE MECANICĂ, INDUSTRIALĂ ȘI
TRANSPORTURI
DEPARTAMENTUL INGINERIA FABRICAȚIEI

METODE ȘI PROCEDEE
DE FABRICARE ADITIVĂ

Note de curs

Chișinău
Editura "Tehnica-UTM"
2021

CZU 621(075.8)

M 53

Acest volum este comparabil cu cărțile de specialitate de top din acest domeniu. Lucrarea va contribui la promovarea tehnologiilor avansate în universitățile din RM, fiind recomandată colegilor de la facultățile de profil din țară, cercetătorilor, inginerilor tehnologi și proiectanților de produse, precum și studenților de la ciclul II master de la programul „Ingineria Produsului și Proceselor în Construcții de Mașini”.

Autor: conf. univ., dr. hab. Sergiu MAZURU

Redactor responsabil: conf. univ., dr. Alexei TOCA

Recenzent: conf. univ., dr. Nicolae TRIFAN

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM

Mazuru, Sergiu.

Metode și procedee de fabricare aditivă: Note de curs / Sergiu Mazuru; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, Departamentul Ingineria Fabricației. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2021. – 144 p.: fig., tab.

Aut. indicat pe vs. f. de tit.

– Referințe bibliogr.: p. 142-144 (34 tit.). – 20 ex.

ISBN 978-9975-45-741-5.

621(075.8)

M 53

Redactor E. Balan

Bun de tipar 30.11.2021

Formatul 60x84 1/16

Hârtie ofset. Tipar RISO

Comanda nr. 101

2004, UTM, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168
Editura ”Tehnica-UTM”

2045, Chișinău, str. Studenților, 9/9

ISBN 978-9975-45-741-5

© UTM, 2021

ADNOTARE

Lucrarea de față abordează un domeniu actual, inovativ și foarte dinamic al tehnologiilor de prelucrare a materialelor, și anume, al tehnologiilor de prelucrare prin adăugare de material (*Additive Manufacturing*). Aceste tehnologii s-au dezvoltat extrem de rapid în ultimele cinci decade, aducând un plus de valoare și o complementaritate la tehnologiile clasice. Prin tehnologii clasice mă refer la cele de prelucrare prin înlăturare (aşchiere, decupare etc.), respectiv, prin redistribuire de material (forjare, matrițare, turnare etc.). Tehnologiile prezentate aici au aplicații în industria de automobile, industria aerospațială, industria dentară și medicală, de bijuterii, încălțăminte, arhitectură, construcții etc. Aceste tehnologii au apărut pe plan mondial la sfârșitul anilor '80 sub denumirea de tehnologii de *Rapid Prototyping*. Odată cu dezvoltarea tehnicii de calcul, a programelor de Proiectare Asistată de Calculator (CAD), a dezvoltării de noi cunoștințe în domeniile fizicii, chimiei, științei și tehnologiei materialelor, a simulării comportării materialelor s-au dezvoltat o serie de noi tehnologii din ce în ce mai complexe, mai inovative, mai performante și mai vizionare (unele dintre ele erau privite doar cu un deceniu în urmă ca fiind de domeniul science-fiction, iar acum sunt aplicate la scară industrială). Timpul de la descoperirea unui fenomen fizic sau chimic nou până la utilizarea lui în tehnologii a scăzut din ce în ce mai mult. Acest lucru s-a datorat, în principal, unui nou mod de abordare a problemelor complexe care apar în cadrul cercetărilor pentru dezvoltarea acestor noi tehnologii, și anume, abordarea multidisciplinară. Considerăm că cercetările care au condus la dezvoltarea acestor tehnologii sunt cele mai relevante din punct de vedere al multidisciplinarității.

Apariția acestor noi tehnologii a condus la cea de-a patra paradigmă în evoluția tehnologică a societății. Prima paradigmă, *producției artisanale*, s-a caracterizat prin aceea ca fiecare produs era proiectat și realizat pentru un anumit client (încălțăminte, haine, hamașamentele pentru cai etc.). Revoluția industrială din

secolele XVIII și XIX a condus la o creștere a productivității și a volumului producției pe variante de produs, ceea ce a făcut ca la începutul secolului XX să se treacă la o altă paradigmă, a *producției de masă* (introdusă de Ford la fabricația modelului de automobil Ford T). În cadrul acestei paradigme sunt produse un număr limitat de produse, acestea fiind realizate într-un număr foarte mare (de masă), presupunându-se că vor fi suficienți cumpărători pentru ele. Anul 1955 se consideră a fi anul caracteristic pentru producția de masă, fiind anul cu volumul cel mai mare de producție pentru o anumită variantă de produs. Începând cu acest an, de cotitură, varietatea produselor crește, iar numărul de produse pe o variantă începe să scadă. Anul 1980 este anul trecerii într-o nouă paradigmă, a personalizării de masă (*mass customization*), în care clientul selectează produsul dorit dintr-o listă de opțiuni înaintea realizării acestuia (exemplul clasic este cel al alegerii configurației autoturismului de către client, apoi lansarea acestuia în producție). În fine, cea de-a patra paradigmă tehnologică este a *producției personalizate* și începe în anul 2000. În această paradigmă, opțiunile produsului sunt alese de către client, cumpărate de la producător, apoi realizate cu sisteme avansate de prelucrare. Un rol esențial la saltul tehnologic în această nouă paradigmă l-au avut tehnologiile de *Rapid Prototyping*, denumite mai nou tehnologii de tip *Additive Manufacturing*. Din cele de mai sus rezultă că tehnologiile de prelucrare au parcurs o dezvoltare ciclică, de la producția artizanală personalizată (orientată pe individ), la producția de masă (orientată pe produs), apoi la cea personalizată de masă (orientată pe grupuri de consumatori) și revenind la producția personalizată (orientată pe consumatorul individual).

Volumul este structurat în șase capitole. Scopul și conținutul capitolelor este prezentat pe scurt în primul paragraf al fiecărui capitol. Primul capitol conține o prezentare generală a tehnologiilor aditive, definiția și clasificarea lor, precum și rolul acestor noi tehnologii în complexul tehnologiilor de prelucrare a materialelor. Este prezentată detaliat evoluția acestor tehnologii de-a lungul ultimelor decenii, avantajele și dezavantajele fiecărei

tehnologii în parte, precum și aplicațiile acestora în diferitele domenii (de la industria de automobile la cea spațială, ajungând la aplicațiile medicale extrem de spectaculoase). Capitolul 2 este dedicat clasificării tehnologiilor pe baza tipului stării materiei prime folosită: lichidă, solidă sau pulverulentă. În capitolul al treilea se prezintă resursele CAD. Prezentarea aplicațiilor acestor tehnologii în fabricația de scule flexibile este prezentată în capitolul 4. Capitolul 5 este orientat asupra utilizării tehnologiilor de fabricație prin adăugare de material la construcția modelelor pentru turnarea metalelor (sistemele LOM, FDM și SLS), iar capitolul 6 - asupra prezentării tehnologiilor de turnare sub vid a pieselor nemetalice în matrițe din cauciuc siliconic.

Acest volum este comparabil cu cărțile de specialitate de top din acest domeniu. Lucrarea va contribui la promovarea tehnologiilor avansate în universitățile din RM, fiind recomandată colegilor de la facultățile de profil din țară, cercetătorilor, inginerilor tehnologi și proiectanților de produse, precum și studenților de la ciclul II master.

CUPRINS

Adnotare	4
1. Tehnologiile de fabricație prin adăugare de material (AM).....	7
1.1. Considerații generale	7
1.2. Clasificarea tehnologiilor de fabricație prin AM	22
2. Principalele procese de fabricație prin adăugare de material	26
2.1. Considerații generale	26
2.2. Procese care folosesc materie primă în stare lichidă	27
2.3. Procese care folosesc materie primă în stare solidă.....	43
2.4. Procese care folosesc materie primă sub formă de pulberi.....	55
2.5. Concluzii și dezvoltări viitoare ale proceselor de fabricație prin AM	74
3. Resurse CAD pentru fabricația pieselor prin (AM)	79
3.1. Considerații generale.....	79
3.2. Obținerea unui model virtual 3D prin utilizarea unor pachete software.....	79
3.3. Obținerea unui model virtual 3D prin utilizarea tehnicilor <i>Reverse Engineering</i>	82
3.4. Obținerea unui model 3D prin tomografiere	85
3.5. Transferul modelului virtual 3D spre sistemul de fabricație AM	89
4. Aplicații ale tehnologiilor de fabricație prin AM.....	99
4.1. Considerații generale	99
4.2. Metode și tehnici de fabricație a unor scule flexibile	101
5. Utilizarea tehnologiilor de fabricație prin AM la obținerea modelelor pentru turnarea metalelor	114
5.1. Considerații generale.....	114
5.2. Fabricația modelelor pentru turnătorie utilizând sistemul LOM-1015	115
5.3. Fabricația modelelor pentru turnătorie utilizând sistemul FDM-1600	136
Bibliografie	142

BIBLIOGRAFIE

1. Akula S., Karunakaran, K.P., *Hybrid Addaptive Manufacturing: An Intelligent Art of Direct Metal Rapid Tooling Process*, Robotics and Computer - Integrated Manufacturing, 22, 2006.

2. Bagchi, T. P., *Taguchi Methods Explained*, Prentice-Hall, 1993, ISBN 0-87692-808-4, India.

3. Berce P., Bâlc, N., Ancău, M., Comșa, S., Jidav, H., Caizar, C., Chezan, H., *Fabricarea rapidă a prototipurilor*, Editura Tehnică, București, 2000.

4. Berce, P., Radu, S.A., *Precision Analysis of Wax Parts Processed by Vacuum Casting in Silicone Rubber Mould*, XXII, MicroCAD, Miskolc, 2009.

5. Bjorklund, O., *Modelling of failure*, Mașter Thesis carried out at Division of Solid Mechanics, Institute of Technology, Dept. of Management and Engineering, SE-581 83, Linkopings University, Sweden, March 2008.

6. Bolboacă, I. L., *Studii și cercetări privind asigurarea calității în procesele de fabricare rapidă a prototipurilor*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2003.

7. Brătian, S., *Contribuții teoretice și experimentale privind optimizarea tehnologiilor de fabricare rapidă a prototipurilor*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2008.

8. Caizar, C., *Cercetări teoretice și experimentale privind utilizarea modelelor RP în domeniul turnării metalelor*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2005.

9. Carley, M.K., Kamneva, Y.N., Reminga, J., *Response Surface methodology*, CMU-ISRI-04-136, Octombrie, 2004.

10. Dimov, S.S., *Dimensional Accuracy of Castform Polystyrene Patterns Produced by Selective Laser Sintering*, Virtual modeling and Rapid Manufacturing, University of Cardilî, 2006.

11. Fodorean, I., *Optimizarea tehnologiilor de fabricație a matrițelor obținute prin pulverizare de metal topit*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2012.

12. Hardro P.J. *et al.*, *A design of experiment approach to determine the optimal process parameters for RP machines*, Proceedings of the 5th Int. Conference on Automation Technology, July 1998, Chiao Tung University, Taipei.

13. Hill, R. *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford, Oxford University Press, 1998.

14. Ilkgun, O., *Effects of Production Parameters On Porosity And Hole Properties in Laser Sintering Rapid Prototyping Process*, PhD Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey, 2005.

15. Jacobs, P.F., *Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, MI., 1992.

16. Khuri, A.I., Siuli, M., *Response Surface Methodology*, Advanced Review, 2, March/April, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

17. Kolossov, S., *Non-linear model and finite element simulation of the selective laser sintering process*, PhD Thesis, EPFL, LGPP, Lausanne, Switzerland, 2005.

18. Lemaître, J., Desmorat, R., *Engineering Damage Mechanics*, Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Netherlands, 2005.

19. Leordean, V.D., *Cercetări teoretice și experimentale privind utilizarea tehnologiilor RP în fabricația de implanturi ortopedice personalizate*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2011.

20. Liao, H.T., Shie J.R., *Optimization on Selective Laser Sintering of Metallic Powder Via Design of Experiments Method*, Rapid Prototyping Journal, 13 (3), 2007, pp. 156-162.

21. Liou, W.F., *Rapid Prototyping and Engineering Applications*, CRC Press, SUA, 2008.

22. Myers, R.H., Montgomery, C.D., *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, New York, 1995.

23. Nikam, P.E., *Application of Subtractive Rapid Prototyping (SRP) for RSP Tooling*, PhD Thesis, Mechanical Engineering Departm, Cleveland State University, USA, 2005.

24. Obris, A., *3D Digitising Based on X-Ray Computed Tomography: State of the Art and Evolution, Industrial Computed Tomography for Reverse Engineering. Applications, Numerisation, 3D Scanning*, 2002.

25. Păcurar, R., *Cercetări teoretice și experimentale privind fabricația elementelor active ale matrițelor prin sinterizare selectivă cu laser (SLS)*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2009.

26. Platon Andre. Soluții actuale de fabricare aditivă. Conf_UTM_2019_1_p/ <http://repository.utm.md/handle/5014/2903>

27. Radu, S.A., *Cercetări teoretice și experimentale privind turnarea sub vid a pieselor complexe nemetalice*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2011.

28. Radu, S.A., Frățilă, D., *Manufacturing the Flexible Moulds to Obtain the Nonmetallic Complex Parts*, ActaTechnicaNapocensis, Series: Machines Constructions, 52, 2009.

29. Șereș I., *Materiale termoplastice pentru injectare, tehnologie, încercări*, Editura Imprimeriei de Vest, Oradea, 2002.

30. Simo, J.C., Hughes, T.J.R., *Computațional Inelasticity*. New York, Springer, 2000.

31. Taguchi G., *Taguchi on robust technology development*, ASME Press, 1993.

32. Voet, A. and Dehaes, J. and Mingneau, J. and Kruth, J.P. and Vaerenbergh van, J., *Laser Sintered Injection Moulds, Case studies made in Belgium*, Proceedings of the PMI, 2005, Paper 534.

33. Yan, Y., Li, R., *Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principie Representative Technics, Applications and Development Trends*, Tsinghua Science and Technology, June, 2009.

34. Yang, H.-J., Hwang, P.-J., Lee, S.-H., *A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method*.