

EFFECTUL ARMĂRII CU FIBRE ASUPRA INTEGRITĂȚII COMPONENTELOR OBTINUTE PRIN FABRICAȚIE ADITIVĂ

Teză de doctorat cumulativă – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat *Inginerie Mecanică*

autor: Ing. Estera VĂLEAN (căs. FLOREA)

conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA

luna Ianuarie anul 2026

Teza de doctorat analizează efectul armării cu fibre scurte de carbon asupra integrității și durabilității componentelor realizate din materialul termoplastice PLA (acid polilactic) și fabricate prin tehnologia de imprimare 3D, FDM (modelare prin depunere fuzionată). Scopul acestei lucrări este de a investiga impactul adăugării de fibre în filamentul polimeric, incluzând o comparație între materialul armat și cel nearmat și oferind o caracterizare detaliată a proprietăților mecanice (tracțiune, încovoiere, impact, tenacitate și oboseală). De asemenea, lucrarea prezintă elemente specifice mecanicii ruperii combinate cu analiza prin element finit.

Fabricația aditivă (AM) este o tehnică de producție progresivă, utilizată pe scară largă în producția modernă. Spre deosebire de metodele tradiționale care îndepărtează materialul, aceasta construiește componente strat cu strat pornind de la un model 3D. Inițial folosită pentru prototipare rapidă în anii 1980, a evoluat într-o metodă de producție viabilă pentru diverse aplicații. Pe măsură ce tehnologia a avansat, utilizările sale s-au extins semnificativ, fiind adoptată pentru producerea de scule rapide și matrițe pentru produse finale. Companii mari precum Boeing și Ford integrează acum această tehnologie în procesele lor. Cea mai populară tehnologie de imprimare 3D este modelarea prin depunere fuzionată (FDM), care extrudează filamente termoplastice strat cu strat pentru a construi un obiect. AM oferă avantaje competitive prin crearea de bunuri personalizate cu forme complexe, eficient și rentabil. O schemă reprezentativă a diagrame de proces pentru imprimarea 3D se poate observa în Figura 1.

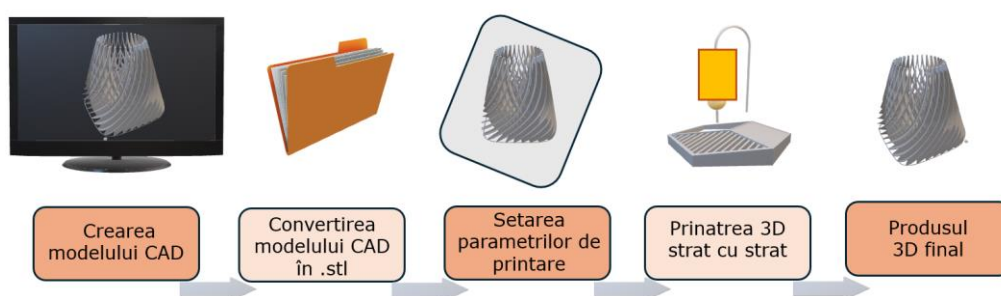


Fig. 1. Diagrama de proces a metodei de imprimare 3D

Această teză este de tip cumulativ și este structurată în 7 capitole: un capitol de introducere, urmat de 5 capitole ce conțin lucrări științifice, și în final, un capitol de concluzii, contribuții personale și obiective viitoare.

Capitolul 1, denumit „*Introducere*”, explorează concepte generale legate de fabricația aditivă pentru materiale compozite, oferind o privire de ansamblu asupra diverselor metode și tehnici utilizate în acest domeniu. Pe măsură ce capitolul avansează, se pune un accent deosebit pe tehnologia de printare prin depunere fuzionată (FDM), explicând principiile și avantajele acestei metode. FDM este tehnologia principală folosită pentru toate experimentele și studiile prezentate în această lucrare, demonstrându-i aplicabilitatea și eficiența în diverse scenarii ale termoplasticelelor ranforsate sau neranforsate cu fibră.

Procesul de imprimare 3D prin depunere fuzionată (FDM) începe cu alimentarea filamentului termoplastic dintr-o bobină către extruder prin rolele de prindere. În extruder, materialul este încălzit peste punctul său de topire și împins prin duză pe platforma de construcție, strat cu strat, pentru a crea obiecte tridimensionale. Platforma de construcție poate fi încălzită pentru a îmbunătăți aderența între straturi, prevenind defectele. După finalizarea fiecărui strat, extruderul și platforma se mișcă pentru a permite depunerea următorului strat. Procesul necesită cel puțin trei axe pentru mișcarea extruderului, asigurând fabricarea completă a obiectului.

Metoda FDM, dezvoltată în anii 1980 și popularizată în anii 1990 de Stratasys Inc., este apreciată pentru precizia, costurile reduse și capacitatea de a crea obiecte 3D detaliate. Utilizând termoplastice solide, FDM permite reciclarea materialelor și procesarea unei game variate de polimeri. Printre avantajele FDM se numără ușurința în operare și flexibilitatea designului, însă există și limitări precum viteza redusă de imprimare și finisajul de suprafață inferior.

Viteza de printare, orientarea printării, unghiul raster, lățimea rasterului, golurile de aer, grosimea stratului și temperatura de extrudare sunt unii dintre cei mai importanți parametri descriși în acest capitol, care influențează rezistența mecanică, termică și fizică a pieselor. Rezistența la întindere este principala proprietate analizată, iar piesele FDM realizate din termoplastice ranforsate cu fibre sunt studiate în detaliu.

În Figura 2 este reprezentat procesul de formare a filamentului cu fibra scurtă folosit ca material de bază pentru tehnologia FDM.



Fig. 2. Procesarea filamentului FDM cu fibre scurte prin amestecare și extrudare

Deși FDM are dezavantaje și proprietăți mecanice compromise, își găsește aplicații în multe domenii datorită potențialului său de inovare. În medicină, FDM este folosit pentru crearea de modele de antrenament și prototipuri pentru planificarea chirurgicală, precum și pentru producerea de măști și proteze. În industria farmaceutică, FDM este apreciat pentru

rentabilitatea și versatilitatea sa în crearea formelor de dozare. De asemenea, FDM este utilizat în industria textilă pentru producerea de structuri împletite și tocuri de pantofi, iar în industria auto și aeronautică pentru piese complexe și ușoare.

Capitolul 2, intitulat „Comportamentul static și de oboseală al PLA imprimat 3D și al PLA întărit cu fibre scurte de carbon”, este reprezentat prin lucrarea științifică numărul 1 și investighează diferențele dintre proprietățile mecanice la tracțiune și oboseală ale componentelor realizate prin FDM pentru două materiale.

Două tipuri de filamente au fost selectate pentru a compara comportamentul lor mecanic: PLA (Silver, Prusa Polymers) și PLA-CF (Sunlu), care conține fibre scurte de carbon (CF) (<20%) infuzate în materialul de bază PLA pentru a-i îmbunătăți proprietățile mecanice.

Geometria probelor de tracțiune a fost proiectată în conformitate cu specificațiile prevăzute în ISO 527-1 pentru probele de tracțiune de tip 1A (Figura 3a), iar geometria epruvetelor de oboseală a fost proiectată conform lui Mortazavian și colab. (Figura 3b). Parametrii de imprimare 3D utilizați au fost aceiași pentru întregul studiu din această teză.

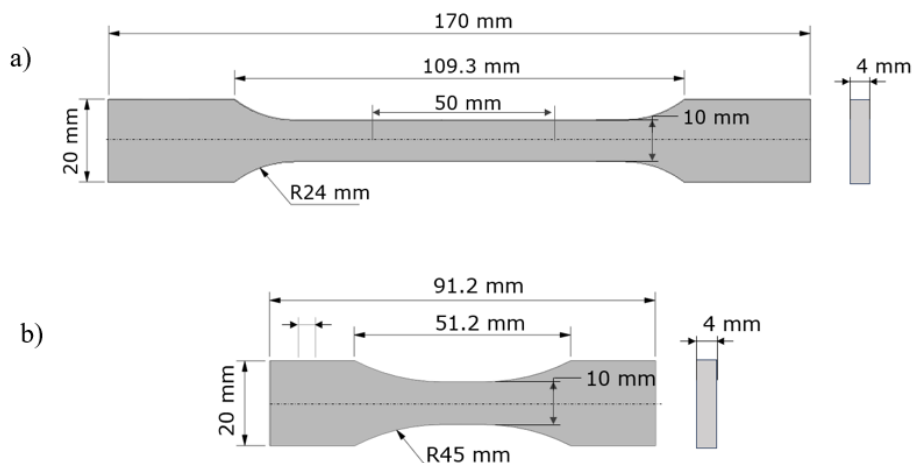


Fig.3. Geometria și dimensiunile epruvetelor de: a) tracțiune și b) oboseală

În urma testelor, s-au obținut corelații bune între rezistența la oboseală și rezistența la tracțiune pentru fiecare tip de material. De asemenea, s-a observat că probele întărite cu fibre de carbon prezintă proprietăți inferioare atât la tracțiune, cât și la oboseală. Proprietățile mai slabe ale epruvetelor din PLA-CF ar putea fi atribuite mai multor factori, cum ar fi porozitatea mai mare și aderența mai slabă între straturile de filament comparativ cu PLA.

Capitolul 3, este reprezentat de lucrarea științifică numărul doi cu titlul „Efectul unghiului de deschidere al creștăturii asupra comportamentului cvasi-static al epruvetelor din PLA și al PLA întărit cu fibre de carbon realizate prin modelarea prin depunere fuzionată (FDM)”. Această lucrare investighează comportamentul la fractură al probelor crestate și realizate prin FDM din PLA și PLA întărit cu fibre de carbon, printr-o abordare energetică locală (SED – Strain energy density). Geometria probelor considerate este netedă și dublu crestată, iar unghiurile de deschidere ale creștăturii variază între 30 și 120 de grade.

Metoda densității energiei de deformare (Strain Energy Density - SED) este o abordare locală bazată pe energie, utilizată pentru a evalua comportamentul la fractură și durata de viață la oboseală a materialelor. Aceasta se bazează pe ideea că fractura fragilă apare atunci când energia elastică totală, mediată pe un volum de control dat, atinge o valoare critică. Metoda SED este validată pe scară largă pentru a evalua fractura atât în condiții statice, cât și dinamice,

fiind un instrument util pentru investigarea comportamentului la fractură și cedarea la oboseală a materialelor.

Valoarea critică a SED a fost obținută prin curba tensiune-deformație a probelor netede pentru cele două materiale studiate. După determinarea lungimii caracteristice a volumului de control, R_0 , datele au fost rezumate în termeni de valori medii ale SED. Sarcinile critice pentru diferitele geometrii și materialele considerate au fost prezise de metodă cu o eroare medie de $\pm 7\%$.

Capitolul 4, intitulat „Comportamentul static și de oboseală al PLA și al PLA ranforsat cu fibre scurte de carbon neted și creștat. imprimat 3D”, reprezintă o lucrare extinsă a celei anterioare prezentate în Capitolul 2, cuprinzând evaluarea comportamentului static și de oboseală influențat de geometria componentelor, folosind metoda densității medii a energiei de deformare (SED). Materialele folosite în această lucrare sunt aceleași ca cele utilizate în capitolele anterioare.

Probele cu aceiași parametri de imprimare au fost pregătite pentru experimentele de tracțiune, oboseală și creștături în V. Pentru creștătură unghiul de deschidere considerat a fost $2\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ pentru testele statice și $2\alpha = 90^\circ$ pentru testele de oboseală.

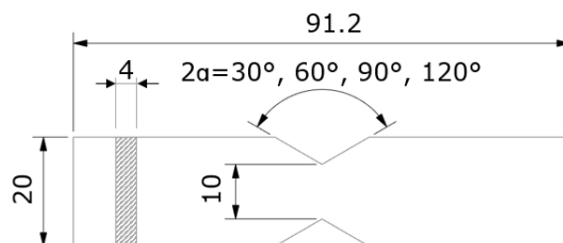


Fig. 4. Geometria și dimensiunile epruvetei Creștate în V

Testele de tracțiune cvasi-statice au fost realizate pe o mașină Zwick Roell 005, cu o celulă de sarcină de 5 kN, conform ISO 527-1. Probele netede și cele cu creștături în V au fost testate la 25°C , cu o viteză de încărcare de 2 mm/min până la cedare. Pentru fiecare material și geometrie, au fost testate cinci probe.

Pentru testele de oboseală, s-a utilizat mașina de testare electrodinamică Step Lab (seria UD/HUD) la un raport de încărcare $R = 0.1$ și frecvență de 5 Hz. Probele netede și cele creștătate în V cu un unghi de deschidere de $2\alpha = 90^\circ$ au fost testate la 75% din tensiunea ultimă de tracțiune, reducând încărcarea de cinci ori până la 2 milioane de cicluri fără cedare. Trei probe au fost testate la fiecare nivel de stres pentru a asigura repetabilitatea rezultatelor.

În urma prelucrării datelor și realizării analizelor FEA, ambele materiale au prezentat un comportament ductil, necesitând stabilirea unui model elastic echivalent pentru aplicarea corectă a metodei SED. Valoarea critică a SED a fost evaluată folosind curba tensiune-deformație “true” a materialelor obținută din probe netede. Pentru PLA, valoarea critică a SED a fost de 0.48 Nmm/mm^3 și R_0 de 0.81 mm, iar pentru PLA-CF, valoarea critică a SED a fost de 0.41 Nmm/mm^3 și R_0 de 0.30 mm. Metoda SED a fost aplicată atât în condiții cvasi-statice, cât și de oboseală, presupunând că influența caracteristicilor stratului exterior ar afecta comportamentul general al materialului, indiferent de geometrie. Procedura a rezultat într-o eroare medie de $\pm 7\%$ între sarcinile critice estimate și cele experimentale pentru diferitele geometrii și materiale. Studiile din literatură arată că unghiurile critice pentru cedare pot varia între 0° și 180° , în funcție de comportamentul materialului, iar aceste tendințe sunt comune și pentru materialele realizate prin tehnici de fabricație convenționale.

O acuratețe mai mare este raportată pentru aplicarea metodei SED în condiții de

oboseală atunci când lungimea caracteristică a volumului de control este evaluată prin considerarea datelor brute ale testelor de oboseală din diferite geometrii; în plus, o astfel de procedură eliberează aplicarea metodei de orice considerație privind numărul de cicluri la care să se determine proprietățile mecanice pentru determinarea R_0 .

Capitolul 5, reprezentat prin lucrarea științifică numărul 4 intitulată: „*Efectul creștăturilor asupra încovoierii statice și dinamice a PLA și PLA ranforsat cu fibre scurte de carbon, imprimate 3D*”, se concentrează pe comportamentul la impact și încovoiere al probelor crestate, realizate din PLA și PLA cu fibră, și printate prin tehnologia FDM.

Testele de impact și îndoire ale probelor au fost realizate conform standardelor ISO 179-1 pentru testele Charpy și ISO 178 pentru îndoire. Testele de îndoire au fost efectuate pe o mașină Zwick Roell de 5 kN, la o viteză de încărcare de 2 mm/min, cu control al deplasării, la temperatura camerei. Testele dinamice au fost realizate pe pendulul instrumentat Instron CEAST 9050, cu un ciocan de 0,9225 kg care impactează probele la o viteză de 2,9 m/s. Probele au fost testate în direcția muchiei, cu o distanță de 60 mm între nicovale. Pentru fiecare tip de material și tip de probă, au fost realizate 6 probe, totalizând 24 de probe testate pentru fiecare tip de test static și dinamic. În Figura 5 se poate observa geometria epruvetelor folosite pentru testele de încovoiere statică și dinamică. Figura 5a reprezintă epruvetele netede, iar Figura 5b reprezintă epruvetele crestate.

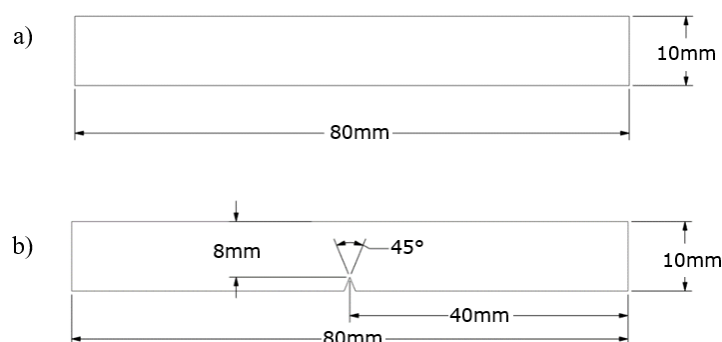


Fig.5. Geometriile probelor de impact și încovoiere: a) netede și b) cu creștătură. Ambele tipuri de probe au o grosime de 4 mm.

În urma prelucrării și prelevării datelor, s-a observat că materialul PLA întărit cu fibre de carbon are proprietăți mecanice mai slabe decât materialul virgin, cu excepția energiei totale de absorbție în încărcare statică. Creștătura reduce rezistența maximă la îndoire cu 22% pentru PLA și cu 25% pentru PLA-CF. Creștătura afectează rezistența maximă la impact cu 85% pentru PLA și cu 93% pentru PLA-CF. Absorbția maximă de energie în încărcare statică se observă la materialul neted PLA-CF, iar în încărcare dinamică la PLA.

Capitolul 6, intitulat „*Sunt fibrele de carbon benefice pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice și de fractură ale compozitelor imprimate prin FDM?*”, este reprezentat prin lucrarea științifică cu numărul 5 și are ca obiectiv evaluarea efectului fibrelor scurte de carbon asupra comportamentului static și dinamic al materialelor polimerice. Studiul include o analiză comparativă între componentele PLA cu și fără creștătură și materialul PETG, pentru a oferi o imagine mai cuprinzătoare a efectelor întăririi cu fibre de carbon asupra proprietăților mecanice. De asemenea, se realizează o analiză morfologică a filamentelor ranforsate cu fibră înainte și după testele de tracțiune, pentru a înțelege mai bine comportamentul mecanic observat.

Creșterea conținutului de fibre în materialele polimerice duce la o rezistență și rigiditate

mai mari, dar orientarea fibrelor și strategia de imprimare influențează proprietățile mecanice obținute. Studiile au arătat că adăugarea de fibre de carbon în PLA, ABS și PETG îmbunătățește modulul de elasticitate și rezistența la tracțiune, cu PETG prezentând cea mai mare rezistență. Totuși, aderența slabă între fibre și matrice poate duce la performanțe mecanice reduse. Cercetările recente indică efecte negative ale adăugării de fibre asupra proprietăților mecanice din cauza vâscozității crescute și porozității. Este necesară o atenție deosebită în selectarea combinațiilor matrice-fibre pentru a asigura cele mai bune rezultate.

Un aspect important este morfologia filamentului, care poate influența comportamentul final al componentelor. Figura 6a și Figura 6b prezintă golurile în filamentele PLA-CF și PETG-CF înainte de testele de tracțiune, care pot duce la concentrații de tensiune și rupere fragilă. După testele de tracțiune, probele PLA-CF au prezentat fenomenul de “crazing”, indicând un comportament mai ductil, în timp ce PETG-CF a avut o rupere fragilă. Crazing-ul, observat prin albirea matricei PLA, produce un comportament mai ductil datorită deformării rețelei fibroase și poroase. PETG pare să aibă fibre mai lungi decât PLA, influențând comportamentul materialului.

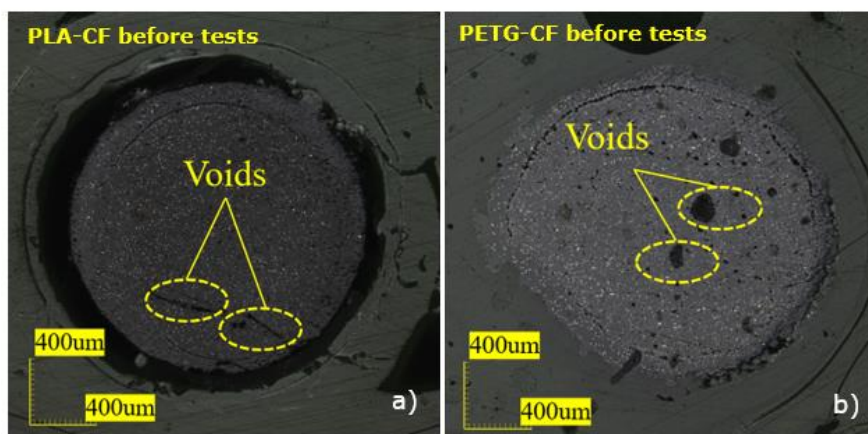


Fig. 6. Golurile în filamentul de: a) PLA-CF și b) PETG-CF înainte de testare

Rezultatele testelor de impact confirmă tendințele observate în celelalte teste experimentale. Întărirea cu fibre de carbon (CF) a avut efecte opuse asupra materialelor studiate: pentru PLA, forța de impact a scăzut cu 21,59% pentru probele fără creștătură și cu 45,89% pentru cele cu creștătură. În contrast, pentru PETG, adăugarea de CF a crescut forța de impact cu 9,77% pentru probele fără creștătură și cu 48,62% pentru cele cu creștătură. Parametrii de imprimare au influențat semnificativ rezultatele experimentale.

Capitolul 7, intitulat „Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare”, oferă o prezentare detaliată și organizată a tuturor rezultatelor obținute în cadrul investigațiilor realizate în teza de doctorat.

Principalele concluzii sunt următoarele:

- Cele două materiale investigate au aproape aceeași rigiditate (modulul lui Young), însă PLA neranforsat are o rezistență la tracțiune maximă cu 20% mai mare (41,86 MPa) comparativ cu PLA ranforsat cu fibre de carbon (33,43 MPa).
- Rezistența la oboseală la 2 milioane de cicluri pentru PLA și PLA-CF a fost de 12,6 MPa și, respectiv, 7,87 MPa.
- Rezistența mecanică mai scăzută (la tracțiune și oboseală) a probelor PLA-CF ar putea fi asociată cu parametrii de proces utilizați pentru fabricarea specimenelor, ceea ce poate duce la o aderență mai slabă între filamente sau la o aderență slabă între matricea PLA

și fibrele de carbon.

- Metoda SED a fost aplicată în condiții statice, rezultând o eroare medie de $\pm 7\%$ în estimarea sarcinii critice a epruvetelor cu creștături. Metoda s-a dovedit a fi adecvată pentru aplicarea sa la aceste componente complexe și merită subliniat că, în concordanță cu rezultatele experimentale, se prezice o sarcină critică minimă de rupere la un unghi de deschidere a creștăturii de 60° .
- Conform rezultatelor observate, o evaluare rapidă și ieftină a comportamentului filamentelor poate dezvălui caracteristici importante pentru a anticipa influența ranforsării cu fibre în materialele imprimate, facilitând selectarea combinațiilor promițătoare de matrice polimerică și fibre.

De asemenea în acest capitol sunt subliniate contribuțiile personale ale autorului, printre care se numără și realizările semnificative din domeniul cercetării. Capitolul 7 se încheie cu o prezentare detaliată a principalelor direcții de cercetare pe care autorul intenționează să le exploreze în viitor, incluzând aspecte inovatoare și potențiale aplicații practice ale studiilor sale.

Bibliografie

- [1] Inayathullah, S., & Buddala, R. (2025). Review of machine learning applications in additive manufacturing. *Results in Engineering*, 25, 103676. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103676>.
- [2] Ranjan, R., Kumar, D., Kundu, M., & Chandra Moi, S. (2022). A critical review on Classification of materials used in 3D printing process. *Materials Today: Proceedings*, 61, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>.
- [3] Joshi, S., Rawat, K., C, K., Rajamohan, V., Mathew, A. T., Koziol, K., Kumar Thakur, V., & A.S.S, B. (2020). 4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges. *Applied Materials Today*, 18, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100490>.
- [4] Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.
- [5] Bănică, C.-F., Sover, A., & Anghel, D.-C. (2024). Printing the Future Layer by Layer: A Comprehensive Exploration of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences*, 14(21), 9919. <https://doi.org/10.3390/app14219919>.
- [6] Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>.
- [7] Hull, C.W. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. U.S. Patent Application No. 638905, 8 August 1984. Hull, C.W. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. U.S. Patent Application No. 638905, 8 August 1984.
- [8] Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2023). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5), 2221–2235. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>.
- [9] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [10] Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *Material Design & Processing Communications*, 2(2).

<https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.

[11] Dutton S, Kelly D, Baker A. Composite Materials for Aircraft Structures; Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2004.

[12] Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223–2253. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7).

[13] Alberto, M. (2013). Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. In *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*. InTech. <https://doi.org/10.5772/54629>.

[14] Clyne TW, Hull D. An Introduction to Composite Materials. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2019.

[15] Chang JH, An YU. Nanocomposites of polyurethane with various organoclays: thermomechanical properties, morphology, and gas permeability. *J Polym Sci B*. 2002;40(7):670-677.

[16] Park, S., Shou, W., Makatura, L., Matusik, W., & Fu, K. (Kelvin). (2022). 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter*, 5(1), 43–76. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>.

[17] Bartnikowski, M., Dargaville, T. R., Ivanovski, S., & Hutmacher, D. W. (2019). Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment. *Progress in Polymer Science*, 96, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.05.004>.

[18] Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., & Wu, L. (2016). Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials & Design*, 102, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.