

Add: Splaiul Independenței nr. 54 sector 5, 050094, București, ROMANIA, Cod Fiscal: 5091859 Tel. 00-4021/314.74.91; Fax. 00-4021/314.75.39, Web-site: <u>www.aos.ro</u>, E-mail: aosromania@yahoo.com

Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin fabricație aditivă

RAPORT FINAL

Autor: Conf. dr. ing. Florin BACIU

Coordonator: Prof. dr. ing. Anton HADĂR

CUPRINS

1. Introducere

2. Tehnologii folosite	3
2.1 Printarea prin procesul FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică	3
2.2 SLA – Stereolitografie (Stereolithography)	4
2.3 DLP – Expunerea digitală a luminii (Digital Light Processing)	6
2.4 SLS – Sinterizare Laser Selectivă (Selective Laser Sintering)	8
3. Teste experimentale	11
3.1 Epruvetele printate	11
3.2 Determinări experimentale ale caracteristicilor mecanice	13
4. Rezultate experimentale și concluzii	18
4.1 Curbele caracteristice ale epruvetelor testate	18
4.2 Proprietățile mecanice și elastice ale epruvetelor testate	27
4.3 Concluzii	30
5. Obținerea de piese prin procedee de fabricație	
aditivă	34
5.1 Fabricarea de piese prin procedeul FDM	34
6. Evaluarea comparativă a procedeelor FA	39

Bibliografie

39

1. Introducere

Fabricația aditivă (AM - Additive Manufacturing), cunoscută și ca tipărire 3D (3D printing), a apărut în anii '80 și, de atunci, a fost subiectul multor cercetări și dezvoltări tehnologice, ajungând la mai multe tehnologii de tipărire 3D (SLS, SLM, LOM, FDM etc.). În 2012, publicația "The Economist" a descris fabricația aditivă, ca fiind a treia revoluție industrială și am asistat la utilizarea acesteia în diferite sectoare industriale, dar și în aplicații de prototipare a proiectelor inginerești și de creare a unor produse personalizate pentru diferite categorii de utilizatori.

Imprimarea 3D este un proces de formare a unui obiect solid tridimensional de orice formă, realizat printr-un proces repetitiv de adăugare a unor straturi succesive de material, în diferite forme. Imprimarea 3D este, de asemenea, distinctă de tehnicile de prelucrare tradiționale, care se bazează, în principal, pe eliminarea materialelor prin metode precum: strunjirea, frezarea etc.

Imprimarea 3D este folosită în prezent în foarte multe domenii, punându-se bazele unui nou salt tehnologic, cu implicații în toate aspectele vieții personale, comerciale și industriale de zi cu zi.

Cunoașterea influenței parametrilor de printare asupra comportamentului materialului printat 3D ajută la îmbunătățirea și la alegerea optimă a acestora pentru piesele prototip sau de serie.

În continuare sunt prezentate influențele gradului și modului de umplere în funcție de viteza de printare a unor epruvete standard, în vederea determinării comportamentului mecanic al acestora (modul de elasticitate, limită de curgere și rezistența la rupere).

Aceste determinări sunt necesare în vederea alegerii parametrilor optimi pentru realizarea materialelor compozite destinate aplicațiilor din medicină și din inginerie.

2. Tehnologii de imprimare 3D

Clasificarea tehnologiilor de imprimare 3D:

- FDM Modelare prin Extrudare Termoplastică (Fused Deposition Modeling);
- > SLA Stereolitografie (Stereolithography);
- > DLP Expunerea digitală a luminii (Digital Light Processing);
- > SLS Sinterizare Laser Selectivă (Selective Laser Sintering);

2.1 Printarea prin procesul FDM - Modelare prin Extrudare Termoplastică

Tehnologia de prototipare rapidă FDM (Fused Deposition Modeling), în traducere Modelare prin Extrudare Termoplastică (depunere de material topit), este cea mai utilizată tehnologie de fabricare aditivată, datorită simplității și accesibilității acesteia. Este utilizată în modelare, în prototipare dar și în aplicații de producție. Alte denumiri utilizate sunt: MEM (Melting Extrusion Modeling), extrudare termoplastică TPE (Thermoplastic Extrusion), FFF (Fused Filament Fabrication).

Cu ajutorul unei aplicații dedicate, de tip software, modelul 3D dorit este feliat inițial în secțiuni transversale numite straturi (lay-ere). Tehnologia de printare constă în trecerea unui filament din material plastic printr-un extrudor, care îl încălzește până la punctul de topire, aplicându-l apoi uniform (prin extrudare), strat peste strat, cu mare acuratețe, pentru a printa fizic modelul 3D, conform fișierului CAD.

Capul (extrudorul) este încălzit pentru a topi filamentul plastic, deplasându-se atât pe orizontală, cât și pe verticală, sub coordonarea unui mecanism de comandă numerică, controlat direct de aplicația CAM a imprimantei. În deplasare, capul depune un șir subțire de plastic extrudat, care, la răcire se întărește imediat, lipindu-se de stratul precedent, pentru a forma modelul 3D dorit.



Fig. 1 Principiul tehnologic FDM și modelul de imprimantă[1] folosit

Pentru a preveni deformarea pieselor, cauzată de răcirea bruscă a plasticului, unele modele profesionale de printere 3D includ, din construcție, o cameră închisă, încălzită la temperatură ridicată. Pentru geometrii complexe sau pentru modele în consolă, tehnologia FDM necesită printarea cu material suport, care, va trebui ulterior, îndepărtat manual. Principiul tehnologic și modelul de imprimantă folosit este prezentat în figura 1.

Materiale utilizate:

ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA (polylactic acid), PVA (solubil), PC (policarbonat), polietilena HDPE, polipropilena, elastomer, polyphenylsulfone (PPSU) și ULTEM Polyphenylsulfone (PPSF), poliamida, ceara de turnare.

Aplicații FDM/MEM:

Piese și subansamble rezistente pentru testare funcțională, design conceptual, modele de prezentare și marketing, piese de detaliu pentru aplicații alimentare sau medicale, subansamble din plastic pentru aplicații la temperaturi înalte, producții de serie foarte mică, forme de turnare etc. Prototiparea matricelor (schele structurale) pentru aplicații medicale din ingineria țesuturilor, prototipare rapidă a pieselor și sculelor de mici dimensiuni.

2.2 SLA - Stereolitografie (Stereolithography)

Stereolitografia (SLA sau SL) este o tehnologie de prototipare rapidă, utilizată pe scară largă în mediul industrial, pentru realizarea matrițelor, modelelor și chiar a

Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin fabricație aditivă

componentelor funcționale. Cunoscută și sub numele de foto-solidificare sau fabricare optică, stereolitografia implică utilizarea unui fascicul laser cu lumină ultravioletă pentru solidificarea unei rășini fotopolimerice lichide, aflată în cuva de construcție a imprimantei. Sub acțiunea luminii laser ultraviolete, această rășină curabilă (sensibilă la lumina ultravioletă) se solidifică în straturi succesive, obținânduse astfel modelul solid 3D. Principiul tehnologic al unei astfel de imprimante este prezentat în figura 2.

Modelul 3D dorit este feliat inițial în secțiuni transversale, pe care fasciculul laser le trasează pe suprafața rașinii lichide. Expunerea la lumina laser ultravioletă solidifică modelul trasat pe rășina lichidă, rezultând un strat solid construit (printat 3D), care se adaugă la stratul precedent construit.

După finalizarea construcției, modelul 3D obținut este imersat într-o baie chimică separată, pentru îndepărtarea excesului de rășină, după care este tratat întrun cuptor cu radiații ultraviolete pentru întărirea finală.



Fig. 2 Principiul tehnologic SLA

Pentru printarea unor geometrii complexe, stereolitografia necesită crearea unor structuri de sprijin pentru susținerea geometriei. Aceste structuri sunt generate automat în timpul pregătirii 3D pe calculator, de aplicația software a imprimantei 3D.

Ulterior finalizării construcției, suporturile vor trebui îndepărtate manual.

Rășina rămasă în cuva de construcție poate fi reutilizată la printările ulterioare.

Tehnologia aplicată este destul de scumpă, lucru care duce la costuri destul de mari pentru imprimantele de tip SLA (pornind de la 40000-50000 EUR).

Materiale utilizate:

Rășini lichide foto-sensibile, materiale ceramice (recent dezvoltate).

Avantaje tehnologie SLA:

Prototiparea de piese de geometrii complexe și extrem de detaliate, suprafețe printate foarte fine și precise, mărimi mari de construcție a pieselor, piesele printate pot fi utilizate ca matriță master pentru industriile de turnare prin injecție (injection molding), termoformare, turnare metale, rezistență la temperaturi înalte a pieselor fabricate.

Dezavantaje tehnologie SLA:

Rezistența medie la prelucrări mecanice, nu rezistă în timp, expunerea lungă la soare deteriorează piesele care devin fragile și casante, necesită operații deranjante de post-procesare (cu substanțe chimice posibil periculoase).

Cost mare al imprimantei, suprafața nu este extrem de finisată, detaliile nu sunt extrem de fine, prototipuri poroase (unele). Rășinile lichide pot fi toxice, ventilație obligatorie.

Aplicații SLA:

Piese și componente extrem de detaliate, modele finisate pentru prezentări de marketing, testare fizică a formei, modele de producție rapidă a sculelor (rapid tooling), aplicații rezistente la temperaturi înalte, matrițe master de turnare.

2.3 DLP - Expunerea digitală a luminii (Digital Light Processing)

Tehnologia de printare DLP (Digital Light Processing) reprezintă un proces de fabricare aditivă bazat pe utilizarea luminii UV, pentru solidificarea unor rășini polimerice lichide. Dezvoltată de Texas Instruments, tehnologia DLP are ca element principal cipul DMD (Digital Micromirror Device) - o matrice de micro-oglinzi, folosite pentru modularea spațială rapidă a luminii.

Inițial, modelul 3D CAD este convertit de aplicația software a imprimantei 3D în secțiuni transversale (felii) ale obiectului, apoi, informațiile sunt trimise către imprimantă și către cipul DMD. Pentru fiecare secțiune transversală a modelului 3D CAD, lumina UV emisă de un proiector este modulată și proiectată prin intermediul cipului pe suprafața rășinii polimerice, aflată în cuva de construcție. Fiecare micro-oglindă individuală a cipului DMD proiectează pixeli din secțiunea transversală a modelului 3D. Sub acțiunea luminii UV, rășina lichidă fotoreactivă (sensibilă la lumina ultravioletă) se solidifică în straturi succesive. Principiul tehnologic al unei astfel de imprimante este prezentat în figura 3.



Fig. 3 Principiul tehnologic DLP

Deoarece, întreaga secțiune transversală este proiectată într-o singură expunere, viteza de construcție a unui strat (secțiuni) este constantă, indiferent de complexitatea geometriei. Indiferent că se printează o piesă simplă sau simultan 10 piese complexe, viteza de printare rămâne constantă.

Obiectele 3D de geometrii mai complexe sunt printate cu ajutorul materialelor suport, care sunt ulterior îndepărtate. Rășina rămasă în cuva de construcție poate fi reutilizată la printările ulterioare. Anumite materiale de printare pot necesita procese ulterioare de întărire în cuptoare UV.

Costurile tehnologiei DLP sunt superioare față de FDM și pornesc de la 15000-20000 EUR pentru imprimante cu volume mici de construcție.

Materiale utilizate:

Rășini, fotopolimeri, rășini transparente, polimeri pe bază de ceară.

Avantaje tehnologie DLP:

Suprafețe printate fine și precise (utilizare în industria bijuteriilor, tehnica dentară, electronică), prototipuri destul de rezistente pentru prelucrare, gama diversă

de rășini, inclusiv materiale bio-medicale (certificate pentru utilizare în domeniul medical) și rășini transparente (prototipuri în industria ambalajelor), imprimante stabile cu puține părți în mișcare.

Tehnologia permite prototiparea pieselor de geometrii complexe și detaliate, viteze mari de printare pentru geometrii complexe și printarea simultană a mai multor piese (productivitate mare).

Piesele printate pot fi utilizate ca matrițe master pentru industriile de turnare prin injecție (injection molding), termoformare, turnare metale.

Dezavantaje tehnologie DLP:

Materiale de construcție mai scumpe, preț imprimante mai mare (pentru volume mari), necesită operații de post-procesare (întărire UV, îndepărtare material suport), necesită manipularea rășinilor (deranj în mediul office).

Aplicații tehnologie DLP:

Prototipuri rezistente pentru testare funcțională, prototipuri și modele fine, precise (bijuterii, modele dentare, modele electronice), prototipuri cu geometrii complexe, fabricare serii mici de modele în medicină (proteze auditive, restaurări dentare, implanturi medicale), prototipuri și modele în media (animație, cinema etc.), modele de turnare bijuterii, scule și unelte, piese și componente în industria auto și aerospațială.

2.4 SLS - Sinterizare Laser Selectivă (Selective Laser Sintering)

Tehnologia de prototipare rapidă SLS (Selective Laser Sintering), tradusă prin Sinterizare Laser Selectivă, a fost patentată la sfârșitul anilor 1980 și este apropiată de SLA. Pe lângă denumirea SLS se folosește pe scară largă și denumirea generică LS (Laser Sintering) sau Sinterizare Laser.

Tehnologia SLS implică folosirea unui fascicul laser de mare putere (ex. un laser CO₂) pentru topirea (sinterizarea) unor pulberi în straturi succesive, obținânduse astfel modelul 3D dorit.

Principiul tehnologic al unei asemenea imprimante este prezentat în figura 4.



Fig. 4 Principiul tehnologic SLS

Modelul 3D dorit este convertit inițial în secțiuni transversale (felii) ale obiectului, trimise apoi imprimantei.

Pe baza informațiilor primite, fasciculul mobil al laserului topește (sinterizează) selectiv stratul de pulbere aflat pe platforma de construcție din interiorul cuvei, conform fiecărei secțiuni transversale.

După finalizarea secțiunii, platforma pe care sunt construite modelele 3D este coborâtă înăuntrul cuvei, cât să poată fi realizată următoarea secțiune transversală. Se aplică un nou strat de pulbere, care este apoi uniformizată, după care procesul se repetă până la finalizarea întregului model 3D, conform fișierului CAD.

În timpul printării, modelul 3D este în permanență încadrat în pulberea de construcție, ceea ce permite printarea unor geometrii extrem de complexe, fără material suport.

Pulberea rămasă în cuva de construcție poate fi reutilizată la printările ulterioare.

Obiectele 3D obținute prin sinterizarea laser sunt poroase și nu necesită finisare ulterioară, decât dacă se dorește întărirea acestora prin infiltrare.

Tehnologia sinterizării laser necesită componente scumpe, ceea ce duce la costuri ridicate ale imprimantelor de acest tip (peste 90000 EUR).

Materiale utilizate:

Pulberi (termo)plastice (nylon, polyamida, polystyren, elastomeri, compozite), pulberi metalice (oțel, titan, aliaje), pulberi ceramice, pulberi din sticlă.

Avantaje tehnologie SLS/LS:

Acuratețe bună a modelului 3D, paleta largă de materiale, piese fabricate rezistente, posibilitatea construcției unor geometrii extrem de complexe, fără material suport, flexibilitate a modelelor printate (pot fi utilizate ca modele finale sau ca modele de testare), nu necesită post-procesare (unele materiale), piese fabricate rezistente la temperaturi înalte.

Nu necesită operații de post procesare (întărire, îndepărtare suport etc.), dacă nu se dorește întărirea mecanică.

Dezavantaje tehnologie SLS/LS:

Tehnologie scumpă, care se traduce în cost mare și în dimensiuni mai mari ale imprimantei, materiale de printare scumpe, suprafață mediu finisată (în comparație cu SLA), detalii medii ca finețe (în comparație cu SLA), prototipuri poroase, care pot necesita operații adiționale de întărire. Timp de răcire mare după printare pentru obiecte mari.

Aplicații SLS/LS:

Piese rezistente pentru testare funcțională, testare la temperaturi înalte, piese cu balamale și cu subansamble de încastrare, producții de serie mică, modele de turnare.

3. Teste experimentale

3.1 Epruvetele printate

Epruvetele printate sunt umplute (infill) cu două tipuri de forme, diagonal și hexagonal, prezentate în figura 5.



Fig. 5 Moduri de umplere (infill) al epruvetelor sau pieselor printate 3D

În vederea determinării influenței gradului de umplere, a modului de umplere și a vitezei de printare au fost printate 78 epruvete din PLA, câte două pentru fiecare modificare de parametru. Aceste epruvete au fost codificate conform tabelului de mai jos. Primele 46 de epruvete au fost prezentate în raportul al doilea, iar celelalte 32 au fost testate ulterior, fiind prezentate în acest raport.

Codul	Gradul de	Modul de	Viteza de
Codui	umplere	umplere	printare
100G40(_1,_2)	100 %	diagonal	40 mm/s
100G60(_1,_2)	100 %	diagonal	60 mm/s
100G80(_1,_2)	100 %	diagonal	80 mm/s
100G100(_1,_2)	100 %	diagonal	100 mm/s
80G40(_1,_2)	80 %	diagonal	40 mm/s
80G60(_1,_2)	80 %	diagonal	60 mm/s
80G80(_1,_2)	80 %	diagonal	80 mm/s
80G100(_1,_2)	80 %	diagonal	100 mm/s
60G40(_1,_2)	60 %	diagonal	40 mm/s

Tabel 1. Tabel cu modul de codificare a epruvetelor

60G60(_1,_2)	60 %	diagonal	60 mm/s
60G80(_1,_2)	60 %	diagonal	80 mm/s
60G100(_1,_2)	60 %	diagonal	100 mm/s
40G40(_1,_2)	40 %	diagonal	40 mm/s
40G60(_1,_2)	40 %	diagonal	60 mm/s
40G80(_1,_2)	40 %	diagonal	80 mm/s
40G100(_1,_2)	40 %	diagonal	100 mm/s
20G40(_1,_2)	20 %	diagonal	40 mm/s
20G60(_1,_2)	20 %	diagonal	60 mm/s
20G80(_1,_2)	20 %	diagonal	80 mm/s
20G100(_1,_2)	20 %	diagonal	100 mm/s
80F40(_1,_2)	80 %	hexagonal	40 mm/s
80F60(_1,_2)	80 %	hexagonal	60 mm/s
80F80(_1,_2)	80 %	hexagonal	80 mm/s
80F100(_1,_2)	80 %	hexagonal	100 mm/s
60F40(_1,_2)	60 %	hexagonal	40 mm/s
60F60(_1,_2)	60 %	hexagonal	60 mm/s
60F80(_1,_2)	60 %	hexagonal	80 mm/s
60F100(_1,_2)	60 %	hexagonal	100 mm/s
40F40(_1,_2)	40 %	hexagonal	40 mm/s
40F60(_1,_2)	40 %	hexagonal	60 mm/s
40F80(_1,_2)	40 %	hexagonal	80 mm/s
40F100(_1,_2)	40 %	hexagonal	100 mm/s
20F40(_1,_2)	20 %	hexagonal	40 mm/s
20F60(_1,_2)	20 %	hexagonal	60 mm/s
20F80(_1,_2)	20 %	hexagonal	80 mm/s
20F100(_1,_2)	20 %	hexagonal	100 mm/s

3.2 Determinări experimentale ale caracteristicilor mecanice

O serie de încercări mecanice, relativ simple, sunt folosite pentru evaluarea proprietăților materialelor. Rezultatele sunt utilizate atât în proiectarea inginerească, cât și ca bază în compararea și alegerea materialelor.

Încercările la tracțiune se efectueză pentru determinarea constantelor elastice și mecanice ale materialelor.

Se determină modulul de elasticitate, *E*, ca o măsură a rigidității, limita de curgere, σ_c , care definește rezistența la apariția deformațiilor plastice și rezistența la tracțiune, σ_r , cea mai mare tensiune convențională care poate exista în material.

Coeficientul lui Poisson, *v* , poate fi calculat dacă se măsoară și deformația specifică transversală. Alungirea la rupere caracterizează ductilitatea materialului, capacitatea de a se deforma fără să se rupă.



Fig. 6 Epruveta de tracțiune [2]

Pentru stabilirea relației între tensiunile normale σ și alungirile specifice ε , se realizează încercarea la tracțiune (la materiale metalice, conform SR EN 10002-1). Se utilizează o epruvetă având forma din figura 6, la care se cunoaște aria A_0 a secțiunii transversale inițiale în porțiunea centrală calibrată și pe care se marchează două repere la distanța L_0 .

Epruveta se obține, în general, prin prelucrarea unei probe dintr-un semifabricat turnat. Produsele cu secțiuni constante (profile, bare, sârme etc.), precum și epruvetele brute turnate (fonte, aliaje neferoase) pot fi supuse încercării fără a fi prelucrate. Secțiunea transversală a epruvetelor poate fi circulară, pătrată, dreptunghiulară, inelară, sau, în cazuri speciale, de alte forme.

<u>Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin fabricație aditivă</u>

Epruveta se montează într-o mașină de încercat la tracțiune, cu ajutorul căreia se aplică, pe direcția axei longitudinale, o forță de întindere *F*, care, în timpul încercării crește continuu, fără șoc sau vibrații, până se produce ruperea acesteia. Concomitent, se măsoară distanța între repere *L*, respectiv alungirea (extensia) epruvetei, $\Delta L = L - Lo$, cu ajutorul unui extensometru.

Dacă se reprezintă grafic forța de întindere F în funcție de alungirea ΔL , se obține o diagramă care depinde de dimensiunile epruvetei, deci, care nu caracterizează materialului de încercat.



Fig. 7 Curba caracteristica a materialului [2]

Dacă se reprezintă grafic dependența între tensiunea normală $\sigma = \frac{F}{A_0}$ și alungirea specifică $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, atunci, se obține curba caracteristică a materialului (fig. 7), denumită și diagrama încercării la tracțiune. Aceasta este o curbă convențională, deoarece, tensiunea se calculează pe baza ariei secțiunii inițiale A_o a epruvetei, iar alungirea specifică, pe baza lungimii inițiale între repere L_o , mărimi mai ușor de măsurat.

Pe curba din figura 7, care corespunde unui oțel cu conținut redus de carbon, s-au marcat câteva puncte importante, ale căror ordonate definesc unele caracteristici mecanice ale materialului.

a) *Limita de proporționalitate* σ_p - este valoarea tensiunii până la care relația între σ și ε este liniară (ordonata punctului A). Ecuația porțiunii OA a curbei caracteristice se poate scrie sub forma legii lui Hooke, $\sigma = E \varepsilon$, a cărei pantă *E* este modulul de elasticitate longitudinal (Th. Young, 1807).

<u>Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin fabricație aditivă</u>

b) *Limita de elasticitate* σ_e - este valoarea tensiunii până la care materialul se comportă elastic (ordonata punctului B), deci, până la care deformațiile sunt reversibile. La unele materiale se definește o limită de elasticitate convențională $\sigma_{0,01}$. Aceasta reprezintă valoarea tensiunii la care apar local primele deformații plastice, căreia, îi corespunde, după descărcarea epruvetei, o alungire specifică remanentă de 0,01% (100 µm/m).

Pentru majoritatea materialelor utilizate în construcția de mașini, limita de elasticitate este foarte apropiată de limita de proporționalitate, deși, cele două mărimi sunt definite diferit. De asemenea, unele materiale pot avea o comportare elastică (revin după descărcare la dimensiunile inițiale), însă neliniară. De exemplu, particulele filamentare denumite whiskers pot avea deformații specifice elastice de până la 2%.

c) *Limita de curgere aparentă* σ_c - este valoarea tensiunii la care epruveta începe să se deformeze apreciabil sub sarcină constantă (ordonata punctului C), marcând apariția deformațiilor plastice ireversibile. Porțiunea CC' a curbei caracteristice se numește palier de curgere. Se disting limita de curgere superioară, σ_{cH} , definită de valoarea tensiunii în momentul când se observă prima scădere a forței aplicate epruvetei și limita de curgere inferioară, σ_{cL} , valoarea cea mai mică a tensiunii în timpul curgerii plastice (C. Bach - 1904), neglijând în acest timp eventualele fenomene tranzitorii.



Fig. 8 Material fără limita de curgere [2]

La unele materiale, palierul de curgere nu există, curba caracteristică având alura din figura 8. Se definește o limită de curgere convențională $\sigma_{0,2}$. Aceasta reprezintă valoarea tensiunii căreia îi corespunde, după descărcarea epruvetei, o alungire specifică remanentă de 0,2% (2 mm/m). d) *Rezistența la tracțiune* σ_r , denumită și rezistență la rupere, este tensiunea corespunzătoare forței maxime înregistrate în cursul încercării, după depășirea limitei de curgere (ordonata punctului D din fig. 7).

Limitele și rezistențele definite pe baza curbei caracteristice convenționale sunt constante de material, deci, sunt valori fixe ale tensiunii normale. Pentru a le distinge de tensiunile de întindere variabile σ , acestea se notează uneori diferit. În încercarea materialelor se folosesc următoarele notații:

- rezistența la tracțiune $\sigma_r = R_m$;

- limita de curgere $\sigma_c = R_e$;

- limita de curgere convențională $\sigma_{0,2} = Rp_{0,2}$ (conform SR EN 10002-1).

Punctul E marchează ruperea epruvetei. Aparent, ruperea se produce la o valoare a tensiunii inferioară rezistenței la tracțiune. Aceasta are loc din cauza faptului că, se trasează o curbă caracteristică convențională, calculând tensiunea prin împărțirea forței *F* la aria inițială A_0 a secțiunii transversale.

Încercările mecanice pentru determinarea curbelor caracteristice, prezentate în acest raport, au fost efectuate pe mașina universală de încercat INSTRON 8872 (fig. 9).



Fig. 9 Mașina de încercat INSTRON 8872

<u>Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin fabricație aditivă</u>

Caracteristicile maşinii sunt: forța maximă 25 kN în regim static sşi ± 25kN în regim dinamic.

Teste posibile:

- tracțiune mediu ambiant;

- tracțiune temperaturi scăzute și ridicate(între -70°C și +120°C);
- compresiune;
- încovoiere in trei puncte;
- oboseală;

- alte teste neconvenționale (piese finite cu gabarit mare - maxim 1m înălțime și lățime).

Pentru a determina comportamentul mecanic al materialelor considerate s-au efectuat teste mecanice distructive și s-a folosit un extensometru, în vederea măsurării deplasărilor (fig. 10).



Fig. 10 Extensometrul prins de epruvetă în timpul testării

4. Rezultate experimentale și concluzii

4.1 Curbele caracteristice ale epruvetelor testate

În figurile 11 - 26 sunt prezentate curbele caracteristice ale epruvetelor testate, câte două pentru fiecare set, pentru ultimele 32 de epruvete testate. Informații referitoare la primele 46 de epruvete testate se regăsesc în referatul al doilea.



Fig. 11 Curba caracteristică a epruvetelor testate (40%, 40mm/s)



Fig. 12 Curba caracteristică a epruvetelor testate (40%, 60mm/s)



Fig. 13 Curba caracteristică a epruvetelor testate (40%,80mm/s)



Fig. 14 Curba caracteristică a epruvetelor testate (40%,100mm/s)



Fig. 15 Curba caracteristică a epruvetelor testate (20%,40mm/s)



Fig. 16 Curba caracteristică a epruvetelor testate (20%,60mm/s)



Fig. 17 Curba caracteristică a epruvetelor testate (20%, 80mm/s)



Fig. 18 Curba caracteristică a epruvetelor testate (20%,100mm/s)



Fig. 19 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (40%, 40mm/s)



Fig. 20 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (40%, 60mm/s)



Fig. 21 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (40%, 80mm/s)



Fig. 22 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (40%, 100mm/s)



Fig. 23 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (20%, 40mm/s)



Fig. 24 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (20%, 60mm/s)



Fig. 25 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (20%, 80mm/s)



Fig. 26 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală (20%, 100mm/s)

4.2 Proprietățile mecanice și elastice ale epruvetelor testate

În urma testelor realizate s-au determinat proprietățile mecanice și elastice, modulul de elasticitate longitudinal, limita de curgere și rezistența la rupere a materialelor (PLA).

În tabelul 2 sunt prezentate atât valorile modulului de elasticitate longitudinal - pentru fiecare epruvetă în parte, cât și valoarea medie a acestuia.

	Modulul de	Media modulului de
Probă	elasticitate	elasticitate longitudinal
FIODa	longitudinal	[MPa]
	[MPa]	
100G40_1	2031,37	2014 465
100G40_2	2057,56	2044,405
100G60_1	2123,45	2130 245
100G60_2	2137,04	2130,243
100G80_1	2094,00	2105 385
100G80_2	2116,77	2105,585
100G100_1	2076,8	2046 425
100G100_2	2016,05	2040,425
80G40_1	1522,94	1540.27
80G40_2	1557,60	1540,27
80G60_1	1522,68	1533.025
80G60_2	1543,37	1555,025
80G80_1	1608,51	1580.83
80G80_2	1553,15	1580,85
80G100_1	1599,18	1502.015
80G100_2	1584,85	1392,015
60G40_1	1280,77	1270.75
60G40_2	1260,73	1270,73
60G60_1	1283,24	1278 34
60G60_2	1273,44	1278,34
60G80_1	1240,71	1236.20
60G80_2	1231,87	1230,29
60G100_1	1303,56	1079 925
60G100_2	1254,11	1278,835
40G40_1	1070,85	1060.005
40G40_2	1067,16	1009,005
40G60_1	1087,19	1088 22
40G60_2	1089,25	1088,22
40G80_1	1041,41	1046 975
40G80_2	1052,54	1040,975
40G100_1	1101,23	1001.2
40G100_2	1081,17	1091,2
20G40_1	1080,46	1050 725
20G40_2	1039,01	1039,733
20G60_1	1033,27	1024 405
20G60_2	1035,54	1034,405
20G80_1	1061,13	1060.1
20G80_2	1059,07	1000,1
20G100_1	1068,86	1066 215
20G100_2	1063,57	1066,215

Modulul de	Media modulului de
elasticitate	elasticitate longitudinal
longitudinal	[MPa]
[MPa]	
1385,47	1421 435
1457,40	1421,435
1449,87	1428 12
1406,37	1428,12
1396,35	1401 77
1407,19	1401,77
1408,43	1407 545
1406,66	1407,545
1258,73	1228 62
1198,53	1228,05
1177,11	1196.92
1196,53	1180,82
1200,87	1102 (05
1166,34	1183,605
1232,06	1041.14
1250,22	1241,14
1120,65	
1134,92	1127,785
1060,15	1010 225
1038,50	1049,325
1096,94	1106.22
1115,70	1106,32
1096,93	1007.04
1073,79	1085,36
1016,60	1022 (0
1030,78	1023,69
1010,31	1005 005
1000,14	1005,225
1002,09	1001 005
1001,52	1001,805
1010,36	101110
1018,62	1014,49
	Modulul de elasticitate longitudinal [MPa] 1385,47 1457,40 1449,87 1406,37 1396,35 1407,19 1408,43 1406,66 1258,73 1198,53 1177,11 1196,53 1200,87 1166,34 1232,06 1250,22 1120,65 1134,92 1060,15 1038,50 1096,94 1115,70 1096,93 1073,79 1016,60 1030,78 1010,31 1000,14 1000,14 1000,152 1010,36 1018,62

Tabel 2. Valorile modulului de elasticitate longitudinal

În tabelul 3 sunt prezentate atât valorile limitei de curgere ale materialelor investigate - pentru fiecare epruvetă în parte, cât și valoarea medie a acesteia.

	Limită de	Media limitei
Probă	curgere	de curgere
	[MPa]	[MPa]
100G40_1	25,47	25.865
100G40_2	26,26	25,805
100G60_1	27,28	27.71
100G60_2	28,14	27,71
100G80_1	27,06	27.55
100G80_2	28,04	27,33
100G100_1	26,42	26 155
100G100_2	25,89	20,155
80G40_1	18,07	18 015
80G40_2	17,96	18,015
80G60_1	18,12	19 255
80G60_2	18,59	18,555
80G80_1	19,20	10.075
80G80_2	18,55	18,875
80G100_1	19,37	10.41
80G100_2	19,45	19,41
60G40_1	15,81	15 79
60G40_2	15,75	15,78
60G60_1	15,88	15.965
60G60_2	15,85	15,865
60G80_1	15,72	15.62
60G80_2	15,54	15,63
60G100_1	16,00	15 70
60G100_2	15,56	15,78
40G40_1	13,12	13,31
40G40_2	13,5	
40G60_1	13,27	13,34
40G60_2	13,41	
40G80_1	12,85	12,865
40G80_2	12,88	
40G100_1	13,53	12.42
40G100_2	13,33	13,43
20G40_1	13,68	12 205
20G40_2	12,93	15,505
20G60_1	13,21	12 225
20G60_2	13,24	15,225
20G80_1	13,45	12 505
20G80_2	13,74	13,393
20G100_1	13,7	12 605
20G100_2	13,69	15,095

Tabel 3.	Valorile	limitei	de	curgere

	Limită de	Media limitei
Probă	curgere	de curgere
	[MPa]	[MPa]
80F40_1	16,99	17.26
80F40_2	17,53	17,20
80F60_1	17,67	17 275
80F60_2	17,08	17,575
80F80_1	17,21	17.36
80F80_2	17,51	17,50
80F100_1	17,63	17 605
80F100_2	17,58	17,005
60F40_1	15,68	15 33
60F40_2	14,98	15,55
60F60_1	14,64	14 825
60F60_2	15,01	14,025
60F80_1	15,17	14.07
60F80_2	14,77	14,97
60F100_1	15,79	15 77
60F100_2	15,75	15,77
40F40_1	14,39	14 31
40F40_2	14,23	14,31
40F60_1	12,75	12 605
40F60_2	12,46	12,005
40F80_1	13,94	14.07
40F80_2	14,2	14,07
40F100_1	13,92	13 875
40F100_2	13,83	15,875
20F40_1	13,00	13 005
20F40_2	13,01	15,005
20F60_1	12,95	12.87
20F60_2	12,79	12,07
20F80_1	12,62	12.74
20F80_2	12,86	12,74
20F100_1	12,66	12 73
20F100_2	12,8	12,75

În tabelul 4 sunt prezentate atât valorile rezistenței la rupere ale materialelor investigate - pentru fiecare epruvetă în parte, cât și valoarea medie a acesteia.

	Limită de	
Probă	rupere	limitei de
1100a	[MPa]	rupere
		[MPa]
100G40_1	27,11	27 505
100G40_2	27,90	27,303
100G60_1	28,71	29.045
100G60_2	29,38	27,045
100G80_1	28,60	28 905
100G80_2	29,21	20,705
100G100_1	28,01	27 78
100G100_2	27,55	27,78
80G40_1	20,21	20.03
80G40_2	19,85	20,03
80G60_1	19,98	20.28
80G60_2	20,58	20,28
80G80_1	21,31	21
80G80_2	20,69	21
80G100_1	21,55	21.60
80G100_2	21,83	21,09
60G40_1	17,31	17.2
60G40_2	17,09	17,2
60G60_1	17,27	17 275
60G60_2	17,28	17,275
60G80_1	17,11	17.00
60G80_2	16,89	17,00
60G100_1	17,50	17.20
60G100_2	17,10	17,50
40G40_1	13,68	12 005
40G40_2	14,09	15,665
40G60_1	13,85	12.02
40G60_2	13,99	13,92
40G80_1	13,51	13 525
40G80_2	13,56	15,555
40G100_1	14,17	14.02
40G100_2	13,89	14,05
20G40_1	14,25	12.025
20G40_2	13,62	13,935
20G60_1	13,98	12.065
20G60_2	13,95	13,965
20G80_1	14,17	14.25
20G80_2	14,33	14,25
20G100_1	14,34	14 225
20G100_2	14,31	14,325

Tabel 4. Valorile rezistenței la rupere

	Limită de	Media
D 1 ×	rupere	limitei de
Proba	[MPa]	rupere
		[MPa]
80F40_1	17,98	18 195
80F40_2	18,41	10,175
80F60_1	18,53	18 19
80F60_2	17,85	10,17
80F80_1	18,11	18.25
80F80_2	18,39	10,25
80F100_1	18,57	18.54
80F100_2	18,51	10,54
60F40_1	16,48	16.16
60F40_2	15,84	10,10
60F60_1	15,58	15 755
60F60_2	15,93	15,755
60F80_1	16,08	15 005
60F80_2	15,73	15,905
60F100_1	16,75	16 695
60F100_2	16,64	10,095
40F40_1	15,24	15 165
40F40_2	15,09	15,105
40F60_1	13,95	12.94
40F60_2	13,73	13,64
40F80_1	14,90	15.02
40F80_2	15,14	13,02
40F100_1	14,82	14 785
40F100_2	14,75	14,785
20F40_1	13,43	12 405
20F40_2	13,38	15,405
20F60_1	13,38	12 245
20F60_2	13,31	15,545
20F80_1	12,90	13.075
20F80_2	13,25	13,075
20F100_1	13,09	13 885
20F100_2	13,22	13,005

4.3 Concluzii

În figura 27 este prezentată variația modulului de elasticitate mediu, pentru fiecare set de epruvete în parte, fiind incluse și rezultatele din raportul precedent [3].

Se constată că, odată cu scăderea gradului de umplere are loc o scădere a modulului de elasticitate longitudinal al materialelor.



Fig. 27 Variația valorii medii a modulului de elasticitate longitudinal



Fig. 28 Variația valorii medii a limitei de curgere

Figurile 28 și 29 prezintă modul de variație a limitei de curgere și respectiv a rezistenței la rupere, pentru fiecare set de epruvete testate.

Se poate observa că, scăderea gradului de umplere duce la scăderea limitei de curgere și a rezistenței la rupere a materialelor analizate.



Fig. 29 Variația valorii medii a rezistenței la rupere

Din analiza diagramelor prezentate anterior, pot fi desprinse următoarele concluzii:

- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 100%, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse atunci când procesul de printare se desfăşoară cu viteza de 60 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 100%, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse atunci când viteza de printare este de 40 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse atunci când procesul de printare are loc cu viteza de 100 mm/s;

- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse la viteza de printare de 40 mm/s;
- 5. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60%, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal şi limitei de curgere sunt atinse atunci când procesul de printare are loc cu viteza 60 mm/s, în timp ce, valorile maxime ale rezistenţei la rupere se ating când se printează cu 100 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60%, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse când viteza de printare este de 80 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 40%, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere se ating în situaţia în care, procesul de printare se derulează cu viteza de 100 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 40%, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse la viteza de printare de 80 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 20%, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere se ating când viteza de printare este de 100 mm/s;
- 10. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 20%, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal şi limitei de curgere sunt atinse atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s, iar cele ale rezistenţei la rupere când se printează cu 40 mm/s;
- 11. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, hexagonală, valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinal este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s, în timp ce, valorile maxime ale limitei de curgere şi rezistenţei la rupere se obțin la o viteză de 100 mm/s;
- 12. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, hexagonală, valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinal este atinsă atunci când se printează cu viteza de 80 mm/s;
- Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, hexagonală, valoarea minimă a limitei de curgere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 40 mm/s;

- 14. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80%, hexagonală, valoarea minimă a rezistenţei la rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s;
- 15. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60%, hexagonală, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere și rezistenței la rupere se ating când viteza de printare este de 100 mm/s;
- 16. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60%, hexagonală, valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinal este obținută atunci când se printează cu viteza de 80 mm/s, iar pentru limita de curgere şi pentru rezistenţă la rupere aceste valori minime apar când se printează cu viteza de 60 mm/s;
- 17. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 40%, hexagonală, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere se ating când viteza de printare este de 40 mm/s;
- 18. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 40%, hexagonală, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal, limitei de curgere şi rezistenţei la rupere sunt atinse când viteza de printare este de 60 mm/s;
- 19. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 20%, hexagonală, valorile maxime ale modulului de elasticitate longitudinal și limitei de curgere sunt atinse la o viteză de printare de 40 mm/s, însă valoarea maximă a rezistenței la rupere se atinge când se printează cu 100 mm/s;
- 20. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 20%, hexagonală, valorile minime ale modulului de elasticitate longitudinal şi rezistenţei la rupere se ating atunci când se printează cu viteza de 80 mm/s, iar valoarea minimă a limitei de curgere este atinsă atunci când viteza este de 100 mm/s.

În funcție de destinația piesei printate, pot fi aleși parametrii de printare optimi (gradul și modul de umplere, viteza), în vederea utilizării cât mai eficiente a materialului.

5. Obținerea de piese prin procedee de fabricație aditivă

5.1 Fabricarea de piese prin procedeul FDM

Modelul virtual tridimensional al unui șurub pentru aplicații medicale (modelat în CATIA V5) este prezentat în figura 30, în mai multe vederi izometrice.

Caracteristici generale ale șurubului: diametrul - 9 mm, lungimea - 25 mm, pasul - 1,8-2 mm, adâncimea filetului - 0,5-2 mm.



Fig. 30 Modelul virtual al unui șurub de interferență

Modelul 3D al șurubului a fost exportat din CATIA V5 în formatul stl și a fost importat în software-ul mașinii FDM Dimension.

În prima etapă s-a verificat corectitudinea fișierului stl, după care, s-a realizat orientarea șurubului în spațiul de lucru al mașinii (fig. 31).



Fig. 31 Poziționarea modelului stl al șurubului în spațiul de lucru al mașinii

Celelalte etape parcurse pentru fabricarea șurubului:

- secționarea fișierului stl al șurubului (obținerea fișierelor ssl, fig. 32);
- generarea structurilor suport necesare pentru construirea prototipului (fig. 33);
- generarea traseelor duzelor de extrudare (obținerea fișierului de tip sml -Stratasys Machine Language, care este transmis mașinii FDM, fig. 34, 35).



Fig. 32 Secționarea modelului stl al șurubului



Fig. 33 Generarea structurilor suport necesare pentru fabricarea șurubului



Fig. 34 Traseele de depunere a materialului pentru șurub și pentru structura suport, la nivelul z=3.5560mm



Fig. 35 Traseele de depunere a materialului pentru șurub și pentru structura suport, la nivelul z=6.6040mm

🤷 Job Log					
9:50:37am > Do	ne generating toolpat	hs after 1 sec.			
9:50:38am > Pai	t start (+0.013533, +0	.144612) was ou	rtside of mo	ideling envelope; CMB m	oved to origin.
9:60:38am > Too	olpath Information				
9:50:38am >	Est. build time:	14 min			
9:50:38am >	Model material:	0.85 cm*			
9:60:38am >	Support material:	0.31 cm*			
9:50:38am > Do	ne writing CMB file a	fter 1 sec.			
9:50:38am > Job	Summary				
9:60:38am >	Full job path:	D:/Diana/Iulian	/ssys_suru	b_diana_var3/surub_dian	a_var3.sjb
9:50:38am >	Modeler:	Dimension			
9:50:38am >	Est. build time:	14 min			
9:60:38am >	Model material:	0.86 cm*,	112,	ABS P400	
9:50:38am >	Support material:	0.31 cm*,	T12,	ABS P400R	
9:50:38am >	Slice height:	0.2540			
9:60:38am >	Part fill style:	Perimeter / ra	isters		
9:50:38am >	Part interior style	Solid - fine			
9:50:38am >	Contour width:	0.5080			
9:60:38am >	Depth of contours	6.3600			
9:50:38am >	Part interior depth	: 1.0160			
9:50:38am >	Part raster width:	0.5080			
9:60:38am >	Application:	Catalyst 3.1, E	Juild version	1: 1719	
9:50:39am > Sa	ved job: D:/Diana/lu	lian/ssys_surub	_diana_var	Vsurub_diana_var3.sjb,	approximate build time
9:00:39am > sa	ved job: D:/Diana/lu	lian/ssys_surub	_diana_vara	Vsurub_diana_var3.sjb	
9:50:39am > Ple	ase define a Dimen	sion modeler.			
9:51:10am > 5a	ved job: D:/Diana/iu	lian/ssys_surub	_diana_vara	vsurub_diana_vars.sjb	
9:01:10am > sa	ved job: D:/Diana/lu	lian/ssys_surub	_diana_vara	vsurub_diana_vars.sjb	
9:51:10am > Sa	ved job: D:/Diana/iu	lian/ssys_surub	_diana_vara	vsurub_diana_vars.sjb	
atoritibam a Pre	ase define a uimen	sion modeler.			
					-
4					
		_	I	V	
		<u> </u>		X	

Fig. 36 Estimarea volumului de material și a timpului de construire



Fig. 37 Model șurub de interferență

Timpul de construire a şurubului este de 14 minute, volumul de material este de 1,16 cm³ (fig. 36).

Prototipul fabricat din ABS P400 este prezentat în figura 37.



Figura 38 prezintă alte modele de obiecte fabricate prin procedeul FDM.

Fig. 38 Modele de obiecte fabricate prin procedeul FDM

6. Evaluarea comparativă a procedeelor FA

Identificarea procedeului FA optim pentru o anumită aplicaţie este dictată de necesităţile şi de constrângerile particulare impuse obiectului de domeniul în care acesta se utilizează, vizând cerinţe specifice legate de material, dimensiuni, precizie dimensională şi de formă, calitate a suprafeţelor, rezistență mecanică, culoare, textură, cost etc. În plus, lucrurile se complică şi mai mult, având în vedere că nu doar tipul procedeului influenţează caracteristicile finale ale obiectului fabricat, ci şi setările parametrilor specifici de proces, orientarea de construire, post-procesarea, chiar şi poziţia din spaţiul de lucru al maşinii în care se construieşte obiectul.

Practic, pentru a răspunde problemei menționate, trebuie comparate avantajele și limitările fiecărui procedeu, fiind necesar să se poată măsura și cuantifica, în mod unitar, performanțele mașinilor de FA.

În ideea de a facilita alegerea procedeului optim pentru o anumită aplicaţie, abordarea specialiştilor a constat mai întâi în sistematizarea informaţiilor disponibile pe grupe de procedee, urmată de compararea performanţelor diferitelor procedee/maşini, prin fabricarea şi măsurarea pieselor test.

De-a lungul timpului, au fost concepute mai multe asemenea piese, care reunesc entități geometrice (features) diverse, cu dimensiuni diferite (grupate, de obicei, în categoriile: mici, medii și mari) și amplasate în diferite poziții/unghiuri față de orientarea de construire. Fiecare entitate geometrică sau serie de entități este utilizată pentru evaluarea uneia sau a mai multor caracteristici (precizie geometrică, contracție, rezistență mecanică, repetabilitate, calitate a suprafețelor, capacitate de fabricare a pereților subțiri, a părților în consolă, a suprafețelor sferice sau cu forme libere etc.). Pentru cei care doresc să aprofundeze aceste aspecte, se recomandă studiile următoare: Kruth (1991), Childs (1994), Ippolitto (1995), Makesh (2004, 2006), Kim (2008).

Cu toate acestea, concluzii generale ale unor astfel de cercetări sunt greu de tras, având în vedere că, diferențele dintre setările parametrilor de proces fac ca piesele test să prezinte caracteristici diferite, chiar dacă au fost fabricate cu același procedeu și pe aceeași mașină.

Următorul pas a fost dezvoltarea de instrumente software suport pentru luarea deciziilor referitoare la alegerea procedeelor de FA în funcție de anumite criterii.

Aceste aplicații software ajută la reducerea câmpului de selecție, sunt bazate pe date despre procedee, maşini şi materiale şi utilizează diferite metode şi criterii de identificare a soluției optime. Spre exemplu, în 1996, Bauer a dezvoltat o aplicație software denumită RP Selector (RP - Rapid Prototyping fiind unul dintre numele alternative date procedeelor de FA), iar în 1997, Phillipson a creat RP Advisor, un instrument software care permite selecția unui procedeu în funcție de calitatea obiectelor fabricate, timp şi cost. Un alt exemplu din aceeaşi categorie este sistemul expert IRIS (Intelligent RP System Selector) creat de Massod, în 2002, care dispune de o bază de date cu 39 de sisteme de FA. IVF Suedia (2005) a dezvoltat un sistem online de selectare bazat pe criterii legate de material/funcționalitate, cantitate şi cerințe ale clienților. Alte cercetări recente în domeniu se pot găsi şi la Ghazy (2012).

Mulți utilizatori și specialiști reproșează însă faptul că, aceste aplicații software permit doar o selecție grosieră, însă, considerăm că principala lor limitare este aceea că, nu au fost bazate pe criterii standardizate de evaluare a performanțelor procedeelor/mașinilor de FA și a calității, preciziei sau proprietăților mecanice ale pieselor fabricate.

Aceste studii comparative ale procedeelor de FA s-au desfășurat în condițiile întârzierii cu care s-a decis și apoi realizat parțial (până în acest moment) standardizarea în domeniul fabricației aditive. Până de curând, nici măcar nu se stabilise numele "oficial" al acestor procedee de fabricație, utilizându-se diferiți termeni (ceea ce nu înseamnă că aceștia sunt incorecți, evident): prototipare rapidă, fabricație pe straturi, printare 3D, imprimare 3D, fabricație rapidă pe straturi, fabricație strat cu strat etc. Se pare că, motivele întârzierii standardizării sunt legate de interdisciplinaritatea acestor procedee, luându-se în discuție inițial includerea lor în alte standarde, de exemplu, în ISO/TC61 - Materiale Plastice sau ISO/TC119 -Metalurgia pulberilor, procedeele de FA utilizând aceste materiale pentru construirea obiectelor.

În anul 1998, NIST (National Institute of Standards and Technology) și-a pus pentru prima dată problema standardizării în FA (deci la 10 ani după apariția primei mașini de stereolitografie). Însă, abia în 2008 a avut loc o întâlnire organizată de SME (Society of Manufacturing Engineers) și care a reunit reprezentanții a peste 80 de firme, producători și specialiști din mediul academic, organizația ASTM (American Society for Testing and Materials) fiind mandatată cu elaborarea standardelor. Au fost identificate patru domenii cheie pentru care s-au înființat comisii: terminologie, metode de testare, materiale și procese, design.

Conform ASTM, aceste standarde permit "fabricanţilor să compare performanţele diferitelor procedee de fabricaţie aditivă", iar "utilizatorilor şi dezvoltatorilor de proces să ofere rezultate repetabile".

În paralel, organismele de standardizare europene au lucrat și ele la elaborarea de standarde în domeniul fabricației aditive.

În anul 2011 s-a înființat comitetul tehnic ISO TC 261 pentru Fabricație Aditivă având sarcina de standardizare a proceselor, procedurilor de testare, terminologiei și a parametrilor de calitate, iar la sfârșitul aceluiași an, ISO și ASTM au încheiat o înțelegere vizând elaborarea în comun a standardelor pentru FA.

Astfel, până în momentul de față au fost adoptate următoarele standarde:

- ISO/ASTM 52915:2013 (Standard specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.1) - conţinând specificaţii ale formatului de fişier standard pentru FA. Formatul stl a fost standardul de facto pentru transferul de informaţii dintre programele de proiectare şi echipamentul de FA, dar necesitatea de fabricare a pieselor multi-material, în culori diferite etc., s-a lovit de limitările stl, impunându-se înlocuirea acestuia.

- ISO/ASTM 52921:2013 (Standard terminology for additive manufacturing -Coordinate systems and test methodologies) - conţine "termeni, definiţiile termenilor, descrierile termenilor şi acronime asociate cu sistemele de coordonate, ca şi metodologiile de testare a tehnologiilor de FA, într-un efort de a standardiza terminologia folosită de utilizatori, producători, cercetători, profesori, presă/media etc. Termenii includ şi definiţii pentru maşini/sisteme şi sistemele lor de coordonate, plus poziţia şi orientarea pieselor. Se intenţionează, acolo unde este posibil, să se asigure conformitatea cu ISO 841 şi să se clarifice adaptarea acestor principii la fabricaţia aditivă".

Conform standardului ISO/ASTM 52921, fabricaţia aditivă este definită ca: "procesul de adăugare de material pentru a obţine un obiect pe baza modelului său digital 3D, de obicei strat cu strat, ca opus al tehnologiilor de fabricaţie prin eliminare de material". De asemenea, acest standard recunoaşte şi clasifică şapte tipuri principale de procedee de fabricaţie aditivă.

BIBLIOGRAFIE

1. www.prusa3d.cz

2. M. Radeş, Rezistenţa materialelor I, Ed. Printech, 2000

3. F. Baciu, A. Hadăr, Influența parametrilor de printare asupra comportamentului mecanic al materialelor printate 3D - Raport 2, 2018

1. J. Richter, P. Jacobs, Accuracy in Rapid Prototyping & Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, 1992, pp.287-315

2. M. Mahesh, Y. S. Wong, Y. H. Fuh, H. T. Loh, Benchmarking for comparative evalu-ation of RP systems and processes, Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, Number 2, 2004, pp.123-135

4. N. P. Juster, T. H. C. Childs, Linear and geometric accuracies from layer manufac-turing, CIRP annals, Vol. 43, Number 1, 1994, pp.163-166

5. R. Ippolito, L. Iuliano, A. Gatto, Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish, Annals of the CIRP, 44, 1995, pp.157-160

6. J.P. Kruth ş.a., Benchmarking of different sls/slm processes as rapid manufacturing technique, Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgia, 2005

7. <u>https://www.zspotmedia.ro/</u>