

**Academia
Oamenilor de Știință
din România**



**Academy
of Romanian
Scientists**

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: www.aos.ro, E-mail: aosromania@yahoo.com

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

Etapă 1

Metode, aparatură și materiale pentru fabricația aditivă - Stadiu actual

Autor:

Conf. dr. ing. Florin BACIU

Coordonator:

Prof. dr. ing. Anton HADĂR

CUPRINS

1. Introducere	2
2. Tehnologii de imprimare 3D	3
2.1 FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică (Fused Deposition Modeling);	3
2.2 SLA – Stereolitografie (Stereolithography)	5
2.3 DLP – Expunerea digitală a luminii (Digital Light Processing)	7
2.4 SLS – Sinterizare Laser Selectivă (Selective Laser Sintering)	9
3. Obținerea de piese prin procedee de fabricație aditivă	12
3.1 Fabricarea de piese prin procedeul FDM	12
4. Evaluarea comparativă a procedeelelor FA	17
Bibliografie	21

1. Introducere

Fabricația aditivă (AM - Additive Manufacturing), cunoscută, de asemenea, și ca tipărire 3D (3D printing), a apărut în anii '80 și de atunci a fost subiectul multor cercetări și dezvoltări tehnologice, ajungând la 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 ingineresti 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.

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 FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică (Fused Deposition Modeling)

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, datorita 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 (layere). 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.

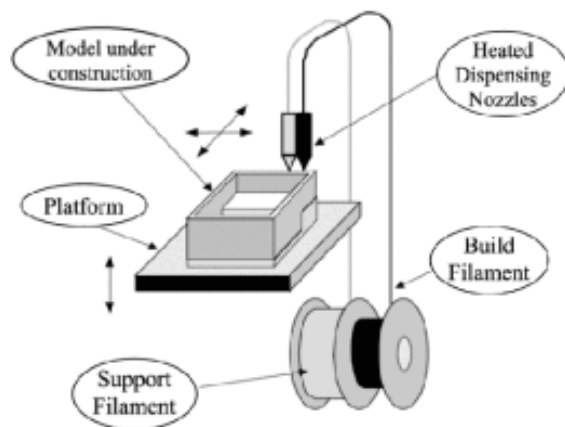


Fig.1 Principiul tehnologic FDM

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 al unei asemenea imprimante este prezentat în figura 1.

În ultimii ani, expirarea patentelor din domeniul tehnologiei FDM a dus la apariția multor producători de imprimante 3D de tip hobby, destul de ieftine. Online, pot fi găsite kituri de asamblare ieftine (de la 500-600 EUR, incluzând sau nu transport și TVA), în timp ce, imprimantele 3D complet asamblate și funcționale pornesc de la ~1000 EUR.

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.

Avantaje tehnologie FDM/MEM:

Tehnologie office-friendly, silențioasă și sigură, pot fi produse obiecte și piese utilizabile, paletă destul de largă de materiale, preț extrem de accesibil al imprimantelor 3D (kituri și modele asamblate), precum și al consumabilelor (role cu filamente), tehnologie simplă de producție, care înseamnă și ușurința în utilizare.

Dezavantaje tehnologie FDM/MEM:

Viteza mică de construcție în cazul unor geometrii mai complexe, posibilitatea existenței unor zone neuniform printate (layere nelipite), impermeabilitate redusă, rezoluție și acuratețe slabă pentru piese mici și detalii fine (microni).

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. 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 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, obținându-se 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 rășinii 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 într-un cuptor cu radiații ultraviolete pentru întărirea finală.

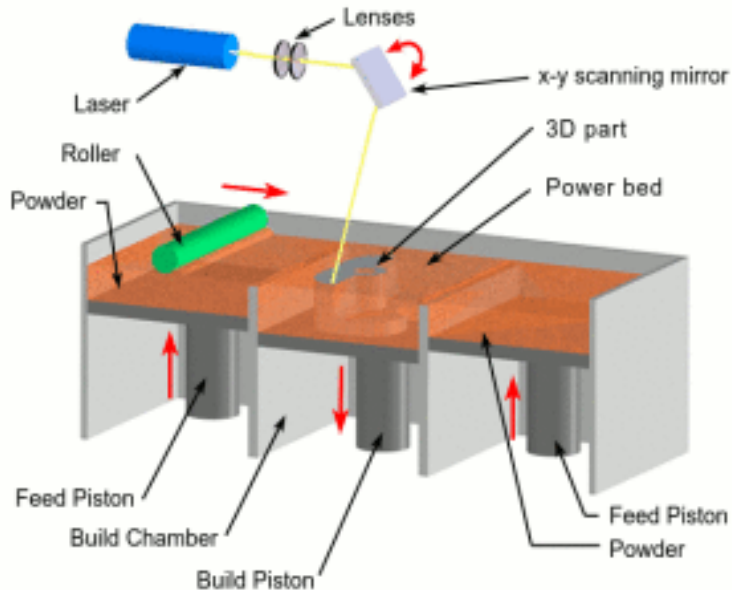


Fig.2 Principiul tehnologic SLA

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-oglinză 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.

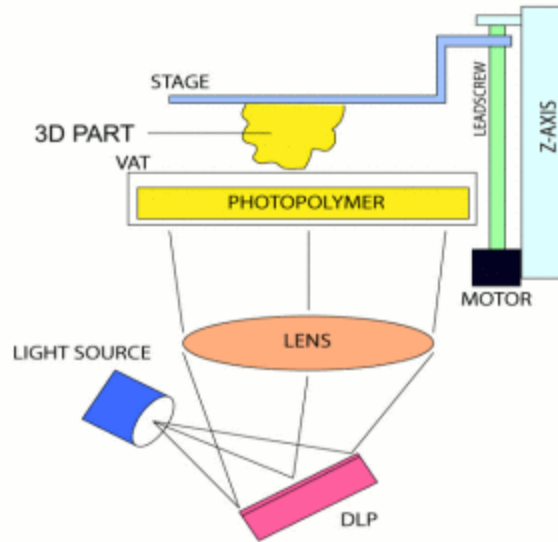


Fig.3 Principiul tehnologic DLP

Deoarece, întreaga secțiune transversală este proiectată într-o singură expunere, viteza de construcție a unui layer (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, obținându-se astfel modelul 3D dorit. Principiul tehnologic al unei asemenea imprimante este prezentat în figura 4.

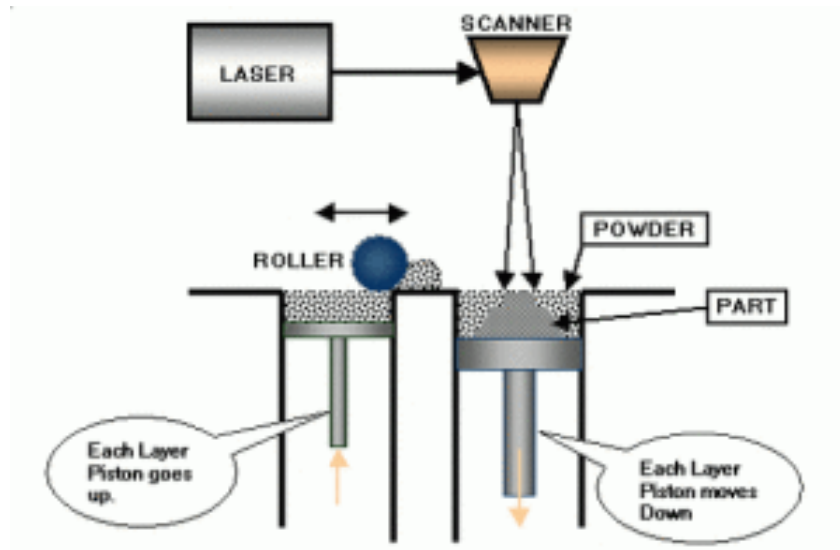


Fig.4 Principiul tehnologic SLS

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 90.000 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. Obținerea de piese prin procedee de fabricație aditivă

3.1 Fabricarea de piese prin procedeul FDM

Modelul virtual tridimensional al unui șurub pentru aplicații medicale (modelat în CATIA V5) este prezentat în figura 9, în mai multe vederi izometrice.

Caracteristici generale șurub: diametru 9 mm, lungime 25 mm, pas 1,8-2 mm, adâncime filet 0,5-2 mm.

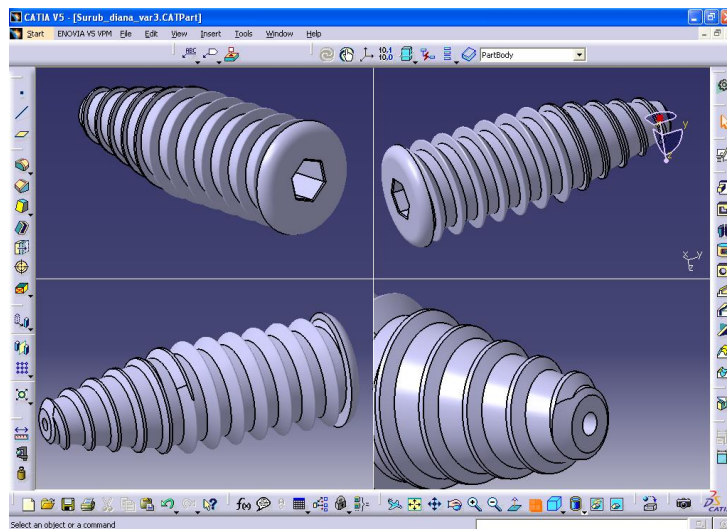


Fig. 9 Modelul virtual al unui șurub de interferență

Modelul 3D al șurubului a fost exportat din CV5 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.10).

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

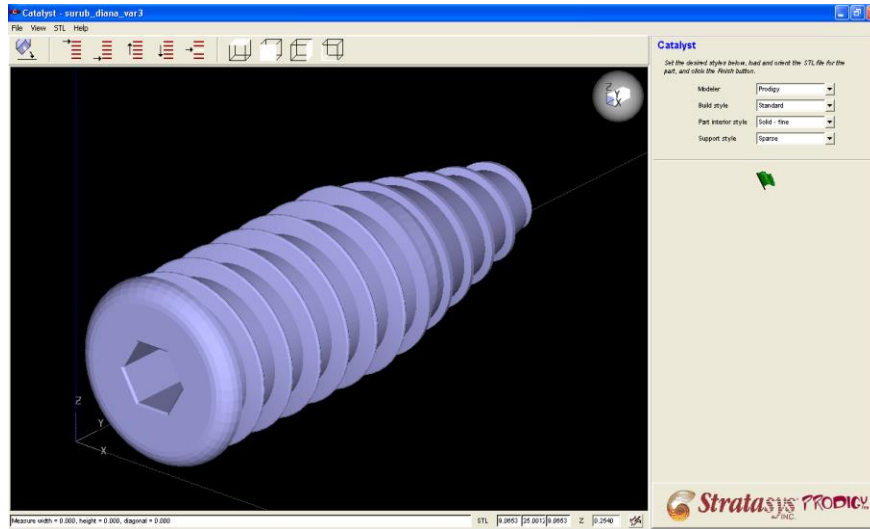


Fig.10 Poziționarea modelului stl al șurubului în spațiul de lucru al mașinii

Celelalte etape parcurse pentru fabricarea șurubului:

- Secționarea fișierului STL al șurubului (obținerea fișierelor SSL) - figura 11;
- Generarea structurilor suport necesare pentru construirea prototipului - figura 12;
- Generarea traseelor duzelor de extrudare (obținerea fișierului de tip SML – Stratasys Machine Language, care este transmis mașinii FDM) - figura 13, 14.

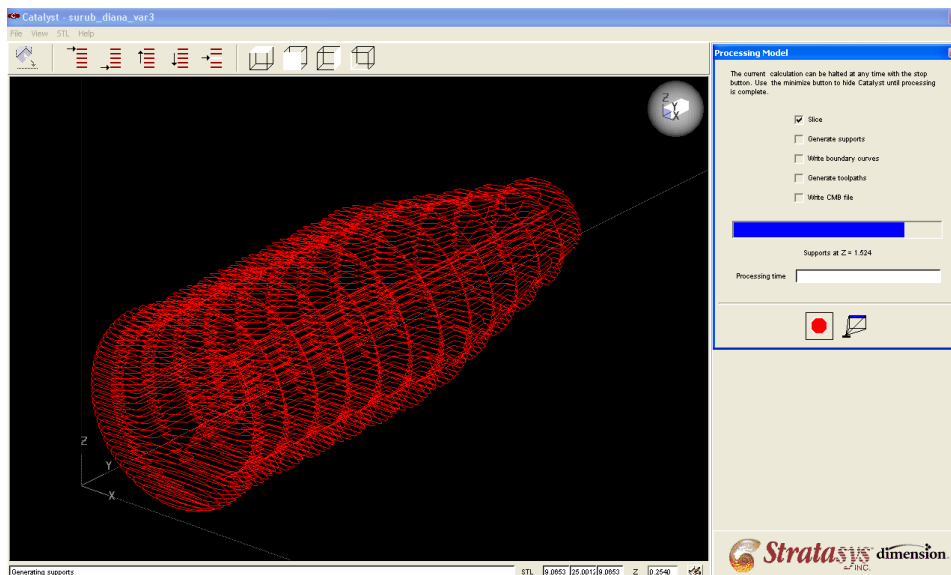


Fig.11 Secționarea modelului stl al șurubului

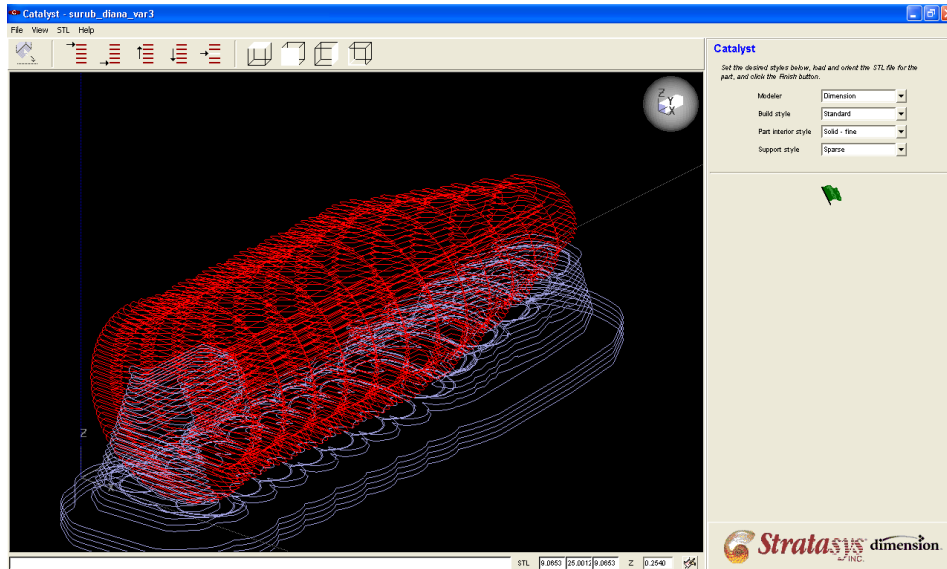


Fig.12 Generarea structurilor suport necesare pentru fabricarea șurubului

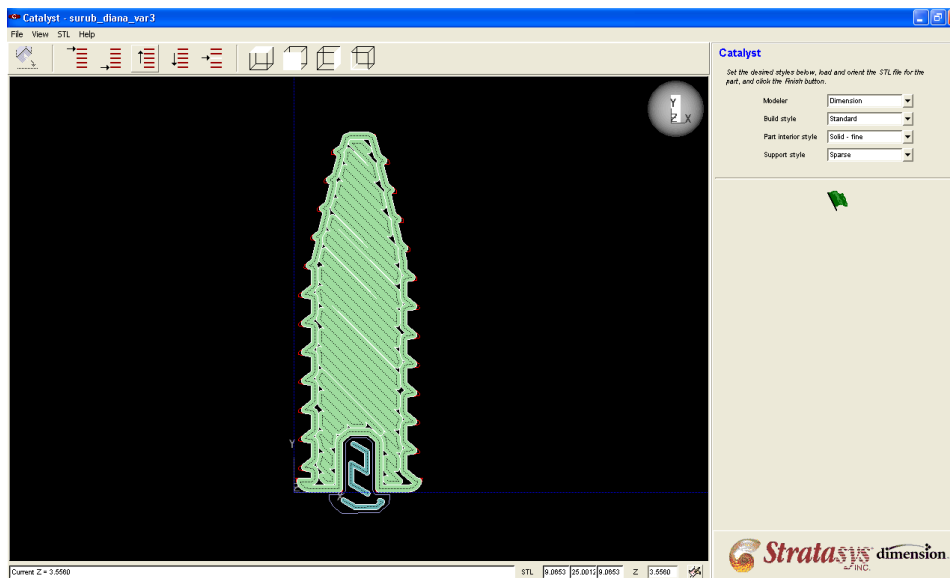


Fig.13 Traseele de depunere a materialului pentru șurub și pentru structura, suport la nivelul $z=3.5560\text{mm}$

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

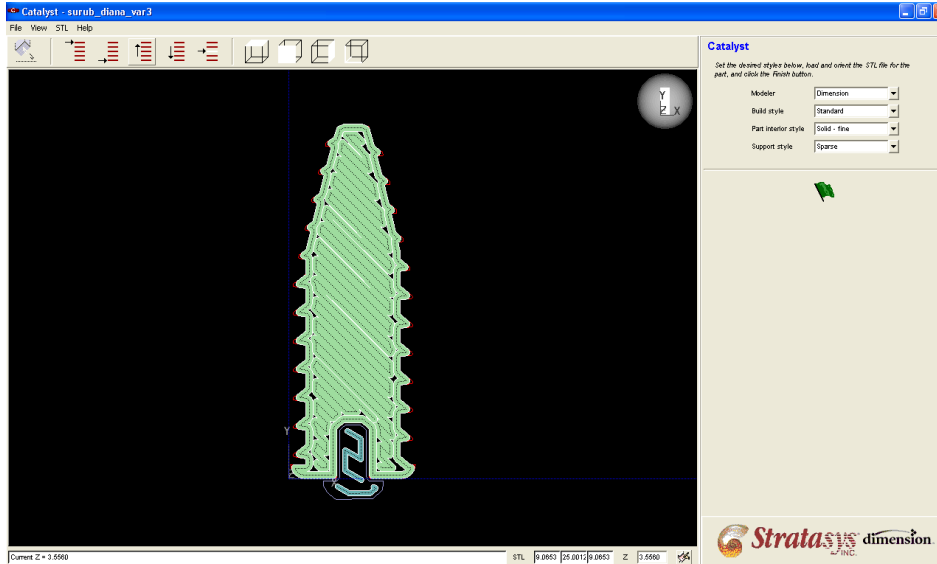


Fig.14 Traseele de depunere a materialului pentru șurub și pentru structura suport, la nivelul $z=6.6040\text{mm}$

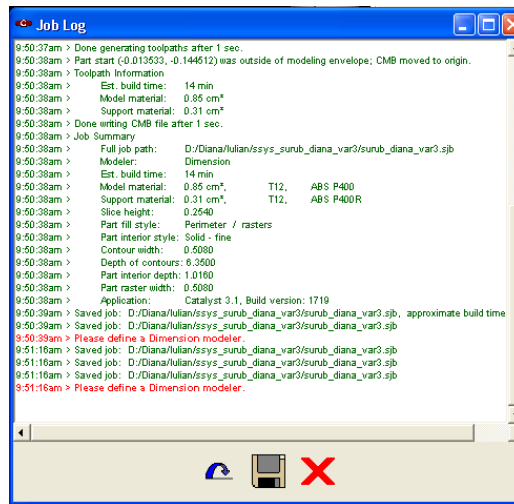


Fig.15 Estimarea volumului de material și a timpului de construire

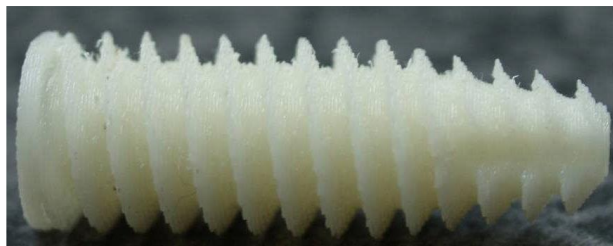


Fig.16 Model șurub de interferență

Timpul de construire a șurubului este de 14 min, volumul de material este de 1,16 cm³ (fig. 15).

Prototipul fabricat din ABS P400 este prezentat în figura 16.

Figura 17 prezintă alte modele de obiecte fabricate prin procedeul FDM.



Fig.17 Modele de obiecte fabricate prin procedeul FDM

4. Evaluarea comparativă a procedeeleor FA

Identificarea procedeeului FA optim pentru o anumită aplicație este dictată de necesitățile și de constrângerile particulare impuse obiectului de domeniul în care acesta se utilizează, vizând cerințe specifice legate de material, dimensiuni, precizie dimensională și de formă, calitate a suprafețelor, rezistență mecanică, culoare, textură, cost etc. În plus, lucrurile se complică și mai mult, având în vedere că nu doar tipul procedeeului influențează caracteristicile finale ale obiectului fabricat, ci și setările parametrilor specifici de proces, orientarea de construire, post-procesarea, chiar și poziția din spațiul de lucru al mașinii în care se construiește obiectul. Practic, pentru a răspunde problemei menționate trebuie comparate avantajele și limitările fiecărui procedeu, adică să se poată măsura și cuantifica, în mod unitar, performanțele mașinilor de FA.

În ideea de a facilita alegerea procedeeului optim pentru o anumită aplicație, abordarea specialiștilor a constat mai întâi în sistematizarea informațiilor disponibile pe grupe de procedee, apoi compararea performanțelor diferitelor procedee/mașini, prin fabricarea și 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 (repetabilitate, precizie geometrică, contracție, rezistență mecanică, 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 procedeeleor de FA în funcție de anumite criterii. Aceste aplicații software ajută la reducerea câmpului de selecție, sunt bazate pe date despre

procedee, mașini și materiale și utilizează diferite metode și 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 procedeeleor 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 și cost. Un alt exemplu din aceeași 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 și cerințe ale clienților. Alte cercetări recente în domeniu se pot găsi și 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 procedeeleor/mașinilor de FA și a calității, preciziei sau proprietăților mecanice ale pieselor fabricate.

Aceste studii comparative ale procedeeleor 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 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 mandată cu elaborarea standardelor. Au fost identificate patru domenii cheie pentru care s-au înființat comisii: terminologie, metode de testare, materiale și

procese, design. În ianuarie 2009 s-a format comitetul ASTM F42 pentru Fabricație Aditivă din a cărei componență fac parte, printre mulți alții: 3D Systems Corporation, Air Force Research Laboratory, Arcam AB, BMW Group, Cornell University, EOS GmbH, Fab@Home Project/NextFab Organization, Siemens AG, Society of Manufacturing Engineers, Stratasys, Inc., Stryker Orthopaedics, The ExOne Company, LLC, NIST, University of Texas at Austin, Georgia Institute of Technology, Honeywell, Loughborough University, Materialise NV, NASA Huntsville.

Conform ASTM, aceste standarde permit „fabricanților să compare performanțele diferitelor procedee de fabricație aditivă”, iar „utilizatorilor și 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: DIN (Germania): NA 145-04 și AFNOR (Franța): UNM 920. La nivel european această acțiune este finanțată prin proiectul SASAM CSA FP7-NMP-2012-CSA-6 CSA Support Action for Standardisation on Additive Manufacturing (www.SASAM.eu), lucrându-se și la elaborarea unei agende strategice de cercetare în domeniu (v. și <http://www.rm-platform.com>).

În 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) – conținând specificații ale formatului de fișier standard pentru FA. Formatul STL a fost standardul de facto pentru transferul de informații dintre programele de proiectare și 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) – conține „termeni, definițiile termenilor, descrierile termenilor și acronime asociate cu sistemele de coordonate, ca și 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 și definiții pentru mașini/sisteme și sistemele lor de coordonate, plus poziția și orientarea pieselor. Se intenționează, acolo unde este posibil, să se asigure conformitatea cu ISO 841 și să se clarifice adaptarea acestor principii la fabricația aditivă”.

Conform standardului ISO/ASTM 52921, fabricația aditivă este definită ca: „procesul de adăugare de material pentru a obține un obiect pe baza modelului său digital 3D, de obicei strat cu strat, ca opus tehnologiilor de fabricație prin eliminare de material”.

De asemenea, standardul ISO/ASTM 52921 recunoaște și clasifică următoarele șapte tipuri principale de procedee de fabricație aditivă:

Tabel 1 Procedee de fabricație aditivă definite conform standardului ISO/ASTM 52921

Procedeu	Exemple de companii producătoare	Materiale
Fotopolimerizare în cuvă (<i>Vat Photopolimerization</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care fotopolimerul lichid dintr-o cuvă este tratat selectiv prin polimerizare activată cu radiație luminoasă. Ex: SLA, SLS, SLM	3D Systems (SUA), Envisiontec (Germania)	Fotopolimeri
Pulverizare de material (<i>Material Jetting</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care picături de material sunt depuse selectiv. Ex: tehnologia PolyJet	Object (Israel), 3D Systems (SUA), Solidscape (SUA)	Polimeri
Pulverizare de liant (<i>Binder Jetting</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care un agent lichid de legare (liant) este depus selectiv pentru a lega materialul sub formă de pulbere. Ex. 3D Printing	3D Systems (SUA), ExOne (SUA), Voxeljet (Germania)	Polimeri, metale, nisip de turnare
Extrudare de material (<i>Material Extrusion</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care materialul este distribuit selectiv printr-o duză sau orificiu. Ex. FDM	Stratasys (SUA), RepRap, Makerbot (SUA)	Polimeri
Fuziunea patului cu pulberi (<i>Powder Bed Fusion</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care energia termică topește și leagă selectiv regiuni ale unui pat de material sub formă de pulbere.	EOS (Germania), 3D Systems (SUA), Arcam (Suedia)	Polimeri, metale
Laminare foi (<i>Sheet Lamination</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care foi de material sunt suprapuse pentru a forma un obiect. Ex. LOM	Fabrisonic (SUA), Mcor (Irlanda)	Hârtie, metale
Depunere cu energie directă (<i>Direct Energy Deposition</i>) – procedeu de fabricație aditivă în care energia termică focalizată este utilizată pentru a lipi materiale prin topire. Ex: tehnologia LENS	Optomec (SUA), POM (SUA)	Metale

BIBLIOGRAFIE

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 evaluation 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 manufacturing, 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 ș.a., Benchmarking of different sls/slm processes as rapid manufacturing technique, Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgia, 2005
7. <https://www.zspotmedia.ro/>