UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREŞTI
Şcoala doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

TEZĂ DE DOCTORAT

-rezumat-

Cercetări privind fabricația aditivă prin depunere de filament topit din polimeri cu temperaturi înalte de procesare

Research on additive manufacturing by deposition of molten filament from polymers with high processing temperatures

Autor, Ing. Aurelian ZAPCIU

Conducător de doctorat, Prof. dr. ing. George CONSTANTIN

București, 2021

CUPRINS

GLOSAR DE TERMENI 6

CAP. 1 FABRICAȚIA ADITIVĂ

1.1 ISTORIC

1.2 CLASIFICARE ȘI TIPURI DE PROCEDEE FA

1.2.1 Stereolitografia

1.2.2 Procedee cu jet de material lichid

1.2.3 Tehnologii de fabricație aditivă cu rașină, prin procesare cu lumină directă (DLP)

1.2.4 Sinterizarea selectivă cu laser pentru polimeri (SLS)

1.2.5 Sinterizarea selectivă cu laser pentru ceramice și metale

1.2.6 Sinterizarea directă a metalelor cu laser (DMLS)

1.3 APLICAȚII ALE FABRICAȚIEI ADITIVE

1.4 TENDINȚE ACTUALE

CAP. 2 TEHNOLOGIA FDM/FFF – FUSED DEPOSITION MODELING – DEPUNERE DE FILAMENT DE MATERIAL 7

2.1 ISTORICUL TEHNOLOGIEI FDM/FFF 7

2.2 PRINCIPIILE DE BAZĂ ALE PROCESULUI DE EXTRUDARE 8

2.2.1 Încărcarea materialului

2.2.2 Lichefierea materialului 8

2.2.3 Extrudarea 8

2.2.4 Solidificarea 10

2.2.5 Controlul de poziție

2.2.6 Adeziunea între straturi 10

2.2.7 Generarea materialului suport

2.2.8 Stabilirea și controlul traiectoriei extruderului.

2.3 DEMOCRATIZAREA PROCESULUI DE FABRICAȚIE ADITIVĂ

2.4 MATERIALE UTILIZATE ÎN PROCESELE FDM/FFF

2.4.1 Acrilonitril-butadien-stiren (ABS)

2.4.2 Acid polilactic (PLA)

2.4.3 Polistiren cu tenacitate ridicată (HIPS)

2.4.4 Nylon

2.4.5 Materiale compozite și compozit plastic-lemn (WPC)

2.4.6 Material conducător de curent electric

2.5 DIRECȚII DE CERCETARE 11

2.5.1 Optimizarea proceselor de generare al volumelor pentru piesele fabricate prin procedee FDM/FFF cu scopul de a economisi material

2.5.2 Dezvoltarea proceselor de generare al volumelor tip ”support” pentru piesele fabricate prin procedee FDM/FFF

2.5.3 Dezvoltarea proceselor pentru optimizare topologică în contextul fabricării pieselor prin procedee fabricație aditivă.

2.5.4 Dezvoltarea proceselor pentru fabricația aditivă cu materiale termoplastice cu temperaturi înalte de prelucrare. 11

CAP. 3 MODELE HARDWARE ALE IMPRIMANTELOR 3D FFF 13

3.1 SISTEME CARTEZIENE

3.1.1 Componente mecanice și electronice

3.1.2 Elementele de acționare ale axelor de mișcare.

3.2 SISTEME TIP “DELTA”

3.2.1 Platforma mașinilor delta

3.2.2 Generarea traiectoriilor în cazul sistemelor delta

3.3 MASA MAȘINII (PATUL DE IMPRIMARE)

3.4 EXTRUDERUL

3.4.1 Sistemul de alimentare cu materie primă

3.4.2 Sistemul de management al temperaturii

3.4.3 Duza de extrudare

3.4.4 Materialul termoplastic folosit ca materie primă

CAP. 4 COMPONENTE ELECTRONICE ȘI SOFTWARE

4.1 INTERFAȚĂ MAȘINĂ-OPERATOR UMAN (HMI)

4.2 SOFTWARE

4.3 FORMATUL STL

4.4 FORMATUL AMF

4.5 PROGRAMUL SLICER

CAP. 5 PARAMETRI DE PROCES 14

5.1 PARAMETRI DE PROCES..... 14

5.2 PARAMETRI DE MEDIU

5.3 PARAMETRI DINAMICI

5.3.1 Viteza de depunere a filamentului topit

5.3.2 Accelerația

5.3.3 Poziția și orientarea piesei în spațiul de lucru al mașinii

5.3.4 Diametrul duzei de extrudare

5.3.5 Înălțimea (grosimea) stratului de material

5.3.6 Lățimea filamentului depus

5.3.7 Retracția filamentului

5.3.8 Numărul de contururi folosite la fabricația suprafețelor exterioare ale piesei

5.3.9 Numărul de straturi inferioare si numărul de straturi superioare

5.3.10 Structura interioară și gradul de umplere a piesei

5.3.11 Diametrul filamentului de material termoplastic

CAP. 6 DETERMINAREA MATERIALELOR NECESARE PENTRU CONSTRUCȚIA UNUI EXTRUDER PENTRU MATERIALE CU TEMPERATURI ÎNALTE DE TOPIRE PE BAZA ANALIZEI TERMICE CU ELEMENTE FINITE 15

6.1 DEFINIREA ANALIZEI CU ELEMENTE FINITE 15

6.2 REZULTATELE ANALIZEI CU ELEMENTE FINITE 17

6.3 DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TEMPERATURILOR DE OPERARE A UNUI EXTRUDER PENTRU FABRICAȚIE ADITIVĂ CU DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT 21

6.4 ANALIZA TERMICĂ CU ELEMENTE FINITE A UNEI PIESE FABRICATE PRIN DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT 26

6.5 MĂSURAREA EXPERIMENTALĂ A TEMPERATURII INTERIOARE A PIESELOR FABRICATE PRIN DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT 32

CAP. 7 IMPRIMANTĂ FDM CU PRINTARE ÎN INCINTĂ VIDATĂ 38

7.1. ASPECTE LEGATE DE COMPORTAMENTUL MATERIALELOR ÎN VID

7.1.1 Pierderile suferite de materialele anorganice în vid.

7.1.2 Pierderile suferite de materialele organice în vid

7.1.3 Schimbări ale proprietăților materialelor anorganice în vid

7.1.6 Materialele plastice în vid

7.2. TRANSFERUL TERMIC ÎN VID 38

7.2.1 Transferul termic în cazul extruderului unei mașini pentru fabricație aditivă prin depunere de filament topit. 38

7.2.2 Transferul termic în cazul materialului depus. 39

7.3 PROIECTAREA IMPRIMANTEI CU INCINTĂ VIDATĂ 40

7.3.1 Dimensionarea structurii de rezistență a camerei vidate 40

7.3.2 Realizarea mișcării relative a extruderului în raport cu platforma mașinii 41

7.3.3 Acționarea axelor liniare 42

7.3.4 Extruderul de filament termoplastic 43

7.3.5 Transferul curentului electric prin pereții camerei cu vid 44

7.4 PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE 45

7.5 STRUCTURĂ MECANICĂ 45

7.6 COMPONENTE ELECTRICE ȘI ELECTRONICE 47

7.7 SOFTWARE ȘI FIRMWARE 48

7.7.1 Firmware 48

7.7.2 Slicer (program de secționare a modelului 3D în straturi orizontale) 48

7.7 INTERFAȚĂ UTILIZATOR

CAP. 8. TESTĂRI EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE 49

8.1 METODĂ ȘI MATERIALE 49
8.2 CALITATEA SUPRAFEȚELOR ȘI PRECIZIE DIMENSIONALĂ 49
8.3 ÎNCERCAREA LA TRACȚIUNE 51
8.4 COMPORTAMENTUL TERMIC AL PIESELOR PRINTATE 3D DIN ULTEM 1010 53
CAP. 9 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU 54
9.1 CONCLUZII GENERALE 54
9.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE 56
9.3 DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU 57
BIBLIOGRAFIE 58

GLOSAR DE TERMENI

ABS – polimerul acrilonitril-butadien-stiren;
DLP – procedeu de procesare directa a luminii (Direct Light Processing);
DMLS – Procedeul de fabricație aditivă prin sinterizare cu laser prin topirea directă a metalelor (Direct Metal Laser Sintering);
FA – Fabricație aditivă;
FDM – procedeul de fabricație aditivă ce foloseste filament topit brevetat de compania Stratasys (Fused Deposition Modeling);
FFF – Procedeul de fabricație aditivă prin depunere de filament topit (Fused Filament Fabrication);
PEI – polimerul polieterimidă;
PLA – polimerul acid polilactic (PolyLactic Acid);
SLS – Procedeul de fabricație aditivă prin sinterizare selectiva cu laser (Selective Laser Sintering)

CAP. 2 TEHNOLOGIA FDM/FFF – FUSED DEPOSITION MODELING – DEPUNERE DE FILAMENT DE MATERIAL

2.1 ISTORICUL TEHNOLOGIEI FDM/FFF

Procedeul FDM a fost comercializat pentru prima dată de către firma Stratasys în anul 1991, brevetele fiind acordate fondatorului companiei, Scott Crump în anul 1992 [33]. Mașinile comercializate de Stratasys au fost bine recepționate, întrucât procedeul de fabricare și structura mecanică a mașinilor au cost redus comparativ cu cele care utilizează stereolitografia, dar explozia de popularitate a procedeului FDM a venit o dată cu exprirarea brevetelor detinute în domeniu.

Procesul produce piese prin extrudarea unui material, de obicei un polimer termoplastic (Fig. 2.1). Extruderul împinge un fir de material termoplastic printr-o duză încălzită deplasîndu-se în planul XY pentru a crea un strat bidimensional. Acest strat reprezintă o secțiune a modelului digital al solidului ce se dorește a fi fabricat. Pentru a asigura fuziunea corespunzătoare între straturile de material, baza pe care se depune primul strat sau incinta mașinii sunt încălzite.

Acolo unde este nevoie, material de suport poate fi depus folosind o duză separată, acesta urmând a fi îndepărtat prin diferite metode după finalizarea fabricației. Precizia și acuratețea procedeului sunt limitate de dimensiunea duzei, care poate avea diametre de ordinul zecimilor de milimetru.

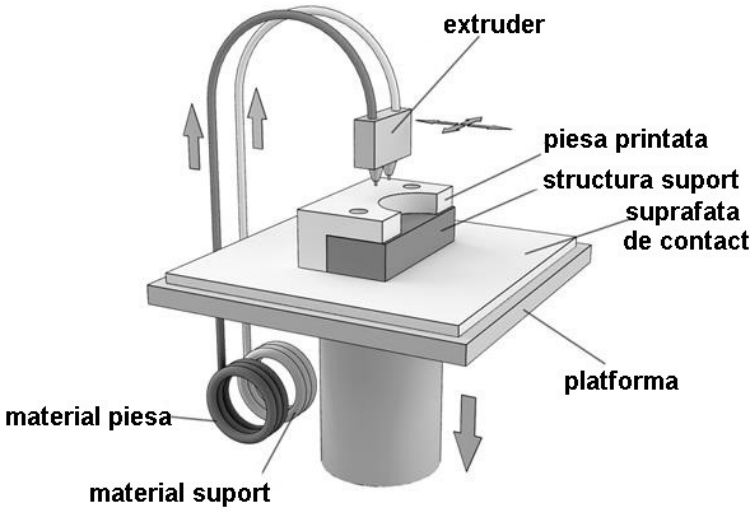


Fig. 2.1. Principiu de funcționare fabricație aditivă prin depunere de filament topit

Tehnologiile care folosesc extrudarea de material folosesc un principiu relativ simplu: un material este forțat printr-un orificiu de dimensiuni bine determinate. Daca forța cu care acest material este împins sau tras prin orificiul respectiv este constantă, atunci și caracteristicile geometrice ale materialului rezultat vor fi constante. În cazul imprimantelor FFF, diametrul firului de plastic rămâne constant dacă mișcarea duzei se desfășoară cu o viteză constantă care corespunde vitezei de alimentare cu filament. Materialul extrudat trebuie să se afle într-o stare de semisolid atunci când trece prin duza mașinii dar trebuie să se solidifice în forma în care a fost depus. În plus, materialul trebuie să adere la straturile de material depuse antecedent, precum și la zonele alăturate din stratul curent.

Din moment ce straturile de material sunt depuse orizontal, mașina de fabricație aditivă FFF trebuie să se poată deplasa în planul XoY. Mai mult, deoarece zonele anumitor piese nu

sunt întotdeauna continue în plan orizontal, mașina trebuie să aiba capacitatea de a opri fluxul de material la cerere, pentru zonele care nu trebuie umplute. La finalizarea stratului de material, mașina trebuie să se poziționeze pe axa Z pentru a putea incepe umplerea stratului urmator. În ceea ce priveste procesul de extrudare, cea mai întâlnită abordare este de a folosi temperatura ca un mod de control al starii materialului. Materialul este lichefiat în interiorul unei cavități sau al unui rezervor, apoi este împins printr-o duză cu diametru determinat, urmând să adere la stratul depus anterior înainte de a se solidifica. Acest proces este asemănător cu procesul de extrudare al polimerilor, cu diferența că extruderul nu este montat orizontal, ci vertical.

2.2 PRINCIPIILE DE BAZĂ ALE PROCESULUI DE EXTRUDARE

Oricare proces de fabricație aditivă care utilizează extrudarea unui filament este compus din anumite elemente comune:

- Încărcarea materialului;
- Lichefierea materialului;
- Aplicarea de presiune pentru a forța materialul prin duză;
- Extrudarea propriu-zisă;
- Parcurgerea de către extruder a unui traseu predefinit, în mod controlat;
- Fuzionarea materialului cu straturile depuse anterior pentru a forma o structură solidă;
- Utilizarea de structuri sau materiale tip suport pentru a permite realizarea elementelor geometrice complexe.

2.2.2 Lichefierea materialului

Metoda extrudării funcționează datorită faptului că materialul o dată ajuns în camera încalzită se lichefiază și căpătă o vâscozitate suficient de redusă cât să poată fi împins prin duză de către presiunea imprimată de mecanismul de tragere. Camera în care se produce lichefierea este încălzită în mod uzual de către bobine de încălzire, prin metode rezistive sau inductive. Căldura aplicată asupra materialului trebuie sa fie constantă și să țină cont de caracteristicile materialului, pentru a nu provoca șocuri termice, curenți termici, schimbarea stării materialului, etc.

De asemenea, unii polimeri se degradează la temperaturi înalte, iar materialul se poate arde, lăsând reziduuri dificil de îndepartat. Soluția este ca materialul să fie menținut la o temperatură cât mai apropiată de temperatura de topire.

2.2.3 Extrudarea

Duza de extrudere decide forma și mărimea filamentului extrudat. O duză cu un diametru mai mare permite materialului să fie extrudat mai ușor și mai rapid, dar produce o piesă cu o precizie mai scăzută și cu diferențe mai mari fața de modelul ideal (CAD). Diametrul duzei determină de asemenea și cele mai mici elemente geometrice care pot fi create. În mod uzual, se recomandă ca elementele geometrice ale pieselor fabricate prin depunere de filament să fie de cel puțin 2 ori mai mari decat diametrul duzei de extrudare.

Principiul de funcționare: spre deosebire de procesele tradiționale de extrudare în care materialul topit este împins prin duză cu ajutorul unui șurub, în cazul fabricației aditive prin depunere de filament topit presiunea vine de la mecanismul de tragere a filamentului. Cu toate acestea, procesul de extrudare poate fi caracterizat printr-o paralelă la extrudarea cu șurub simplu arhimedean. În cazul modelului cu surub, materialul topit se mișcă de-a lungul canalului șurubului până la capatul șurubului unde se afla duza. Viteza V a fluxului de material topit de-a lungul canalului este

$$V = \pi DN \cos \varphi, \tag{2.1}$$

unde D este diametrul șurubului, N este turația șurubului iar φ este unghiul urubului. Viteza W a materialului U înspre duză este deci:

$$U = \pi DN \sin \varphi. \tag{2.2}$$

Pentru un unghi constant al spiralei șurubului, fluxul volumetric făcut de surub în teava, cunoscut ca flux de frecare Q_D este proporțional cu dimensiunile și turația șurubului

$$QD = D2NH, \tag{2.3}$$

unde H este înalțimea spirei șurubului.

În cazul fluxului de frecare viteza relativă a materialului topit este *V* pentru materialul aflat în contact cu șurubul și 0 pentru materialul aflat în contact cu pereții tubului. Astfel, atunci când materialul topit trece printr-un canal de grosime *B* și înălțime *dy*, fluxul de-a lungul canalului QD poate fi exprimat ca

$$\mathrm{Q_D} = \int_0^H \frac{V}{2} B dy = \frac{VBH}{2}. \tag{2.4}$$

Înlocuind V în relația precedentă se obține

$$\mathrm{Q_D} = \frac{\pi}{2}\mathrm{DNBH}\cos\varphi. \tag{2.5}$$

Presiunea în canalul de lățime L și înălțime H poate fi derivată din ecuația tensiunii la rupere

$$\tau(x) = \frac{\Delta P}{L}x, \tag{2.6}$$

unde x este perpendicular pe direcția fluxului și ΔP este variatia presiunii de-a lungul canalului. Pentru o curgere de tip Newtonian, τ poate fi exprimat ca

$$\tau = \boldsymbol{\eta}\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}x}, \tag{2.7}$$

unde η este vâscozitatea dinamică a polimerului topit. Combinând cele 2 relații anterioare obținem

$$-\boldsymbol{\eta}\frac{dv_z}{dx} = \frac{\Delta P}{L}\mathrm{d}x. \tag{2.8}$$

Putem calcula viteza medie V_m a materialului topit printr-o fantă rectangulară integrând ecuația de mai sus intre 0 și $\pm H$ / 2 (centrul canalului)

$$Vm = \frac{1}{H}\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} v_z(x) = \frac{\Delta P H^2}{12\boldsymbol{\eta}L}. \tag{2.9}$$

Întrucât presiunea este determinată de volumul de material care curge prin canal în timp,

$$Q_P = \frac{BH^3}{12\eta}\cdot\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z}. \tag{2.10}$$

Pentru ca extrudarea să fie posibilă, condiția care trebuie indeplinită este ca presiunea exercitată asupra duzei să fie mai mare decat cea exercitată asupra materialului.

$$Q_T = Q_P - Q_D, \tag{2.11}$$

$$\frac{BH^3}{12\eta}\cdot\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z} - \frac{VBH}{2} > 0. \tag{2.12}$$

O ecuație similară poate fi scrisă și în cazul duzei circulare folosite în procesul de fabricație aditivă cu filament de material. Sistemul de alimentare cu filament cu role folosit de

majoritatea mașinilor FFF este cel care generează presiunea necesară extrudării. Dacă forța exercitată de sistemul de alimentare este mai mare decat presiunea de ieșire, filamentul se poate îndoi în drum spre duză. O analiză amanunțită a procesului de extrudare în care alimentarea se face cu un sistem cu role este facută de Turner [22]. Aceasta analiză indică dependența parametrilor procesului de cei ai materialului extrudat, arătând că materialele casante sunt mai greu de controlat în timpul procesului. Cu cât materialul este mai flexibil de asemenea crește nevoia de control precis al alimentarii cu filament pentru a evita îndoirea filamentului.

2.2.4 Solidificarea

O dată ce materialul a fost extrudat acesta trebuie să își păstreze forma, poziționarea și dimensiunile inițiale. În practică, mulți factori schimbă aceste caracteristici, printre cei mai importanți numărându-se gravitația, tensiunea la suprafață a materialului topit și coeficientul de dilatare termică. De multe ori, dilatarea și contractarea termică nu sunt lineare, ceea ce provoacă deformări ale piesei finale. Acestea pot fi evitate prin controlul precis al temperaturii camerei în care se face depunerea de material dar și al procesului de răcire.

Este de asteptat ca procesul de extrudare în cazul masinilor de fabricație aditivă să se desfășoare printr-o duză cu intrare conică și ieșire cilindrică. Materialul topit aderă la pereții incintei unde are loc lichefierea, iar viteza materialului în aceste zone de contact este 0. Prin urmare, tensiunea de rupere poate fi scrisă ca

$$\tau = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\varphi}\right)^{1/m}, \tag{2.13}$$

unde m reprezintă exponentul curgerii iar φ este fluiditatea materialului. Exponentul m reprezintă caracteristicile curgerii pentru un anumit material și deviația de la comportamentul newtonian.

2.2.6 Adeziunea între straturi.

Pentru sistemele bazate pe caldură, în material trebuie să existe suficientă căldură remanentă pentru a activa suprafețele regiunilor care intră în contact, cauzând adeziune. Acest proces poate fi vizualizat ca o funcție a energiei introduse în material de catre capul de extrudare. Daca energia transmisă este insuficientă, anumite regiuni pot avea o adeziune incompletă și pot duce la distrugerea piesei. O data ce materialul a fost extrudat, acesta trebuie să se solidifice și să adere la materialul depus anterior. Yardimci a definit o serie de ecuații care descriu procesele termice care au loc intr-un filament de material extrudat depus într-o direcție *x*, în funcție de proprietățile materialului [23]:

$$\rho \frac{\delta q}{\delta q} = k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - S_c - S_1, \tag{2.14}$$

unde ρ este densitatea materialului, q este entalpia specifică, k este conductivitatea termică, T este temperatura medie în secțiunea firului de material depus. Factorul S_c descrie pierderile de energie prin convecție

$$S_c = \frac{h}{h_{eff}}(T - T_\infty), \tag{2.15}$$

unde h este coeficientul de transfer termic prin convecție iar h_{eff} este un factor geometric reprezentând raportul dintre volumul traseului depus și suprafața pe care se produce răcirea prin convecție. Temperatura T_∞ reprezintă temperatura constantă a mediului extern iar k este un termen care descrie interacțiunile termice dintre firele de material adiacente:

$$S_1 = \frac{k}{l^2}(T - T_{adc}), \tag{2.16}$$

unde l este lățimea traseului curent iar T_{adc} este temperatura firului adiacent depus anterior. În mod evident, rolul termenului S_1 este de a descrie faptul că dacă depunem material lângă un traseu depus anterior, răcirea traseului proaspăt depus va fi mai lentă.

Se poate identifica o temperatură critică T_c care trebuie atinsă pentru ca procesul de adeziune să fie activat și sub care adeziunea completă și corectă nu este posibilă. Putem astfel descrie un termen care să exprime potențialul unui traseu de a adera la restul piesei ca:

$$\varphi = \int_0^t (T - T_c)\mathrm{d}\tau. \tag{2.17}$$

2.5 DIRECȚII DE CERCETARE

2.5.4 Dezvoltarea proceselor pentru fabricația aditivă cu materiale termoplastice cu temperaturi înalte de prelucrare.

Găsirea de noi materiale, cu proprietăți superioare, care pot fi folosite la fabricarea pieselor funcționale este una dintre prioritățile cercetătorilor din domeniul fabricației aditive. Una dintre categoriile de interes o reprezintă materialele plastice de tipul "engineering plastics" (plastice pentru inginerie). Astfel de materiale plastice, precum polieterimida (PEI) sau polieter-eterketona (PEEK) sunt folosite în industrie atât pentru proprietățile lor mecanice deosebite, cât și pentru rezistența chimică.

Prelucrarea acestor materiale prin fabricația aditivă este mai dificilă decât cea a materialelor utilizate în mod uzual. Temperaturile mari de topire presupun folosirea unor componente specializate și prezintă dificultăți în ceea ce privește interacțiunea cu mediul înconjurător în timpul procesului de fabricație aditivă. În cadrul acestei teze a fost elaborată o schemă de activități care vor permite formularea unor concluzii privind fabricația aditivă prin depunere de filament topit din polimeri cu temperaturi înalte de procesare. Schema, prezentată în Fig. 2.18, include activități de analiză termică cu elemente finite pentru anumite componente ale unei imprimante 3D, analize termice cu elemente finite pentru piese în timpul fabricației, precum și validarea experimentală a acestor analize. Aceste analize vor fi utilizate pentru stabilirea unor cerințe tehnice pentru o imprimantă cu incintă de printare vidată și a unui set de parametri de proces. În urma construcției imprimantei vor fi fabricate epruvete de test care vor fi supuse testărilor distructive și nedistructive pentru determinarea unor proprietăți mecanice și termice.

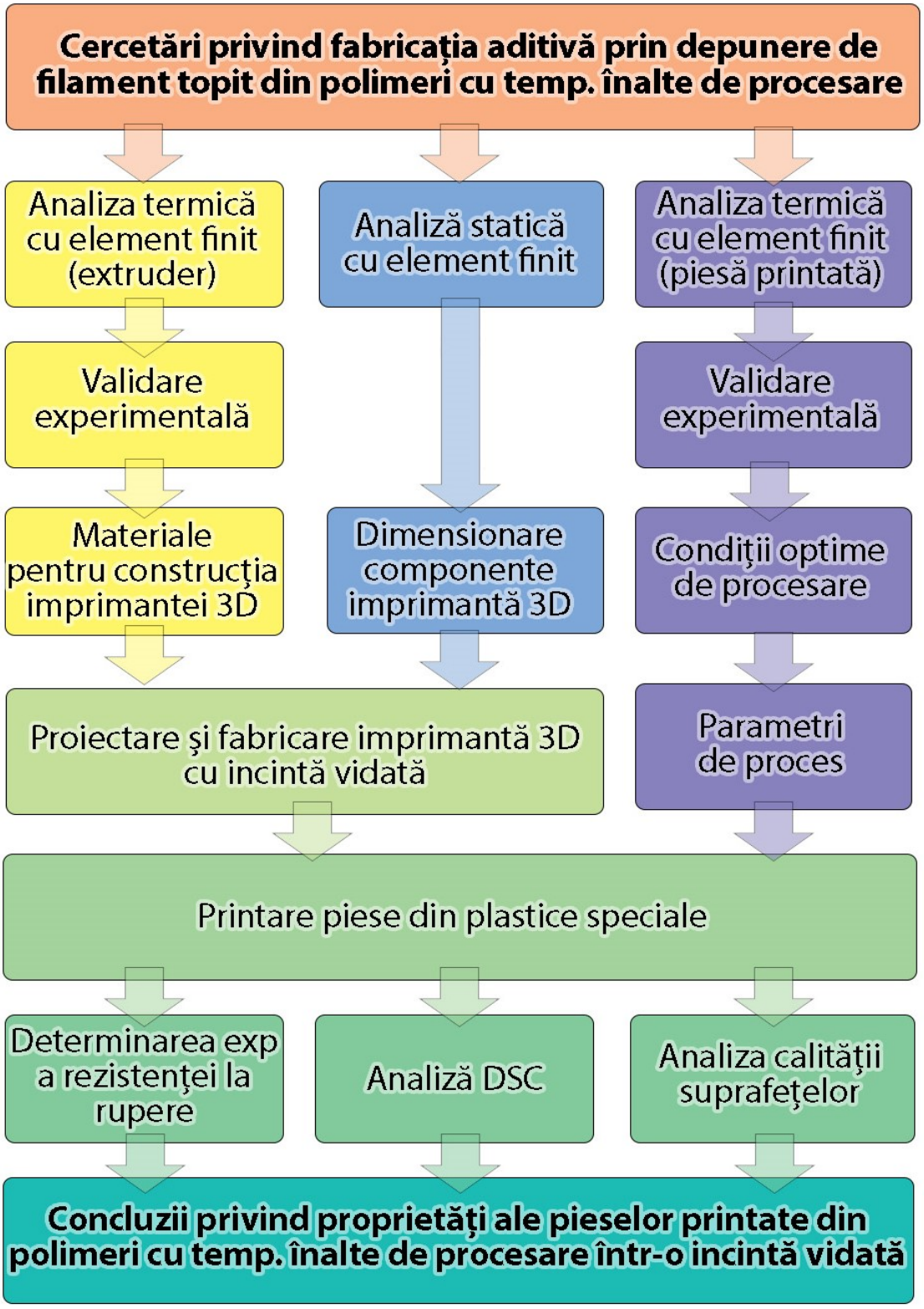


Fig. 2.18. Schema cu activitățile de cercetare privind fabricația aditivă prin depunere de filament topit din polimeri cu temperaturi înalte de procesare

CAP. 3 MODELE HARDWARE ALE IMPRIMANTELOR 3D FFF

Din punct de vedere al părților componente, o mașină de fabricație aditivă care utilizează procedeul FFF poate fi reprezentată schematic în modul indicat în Fig 3.3.

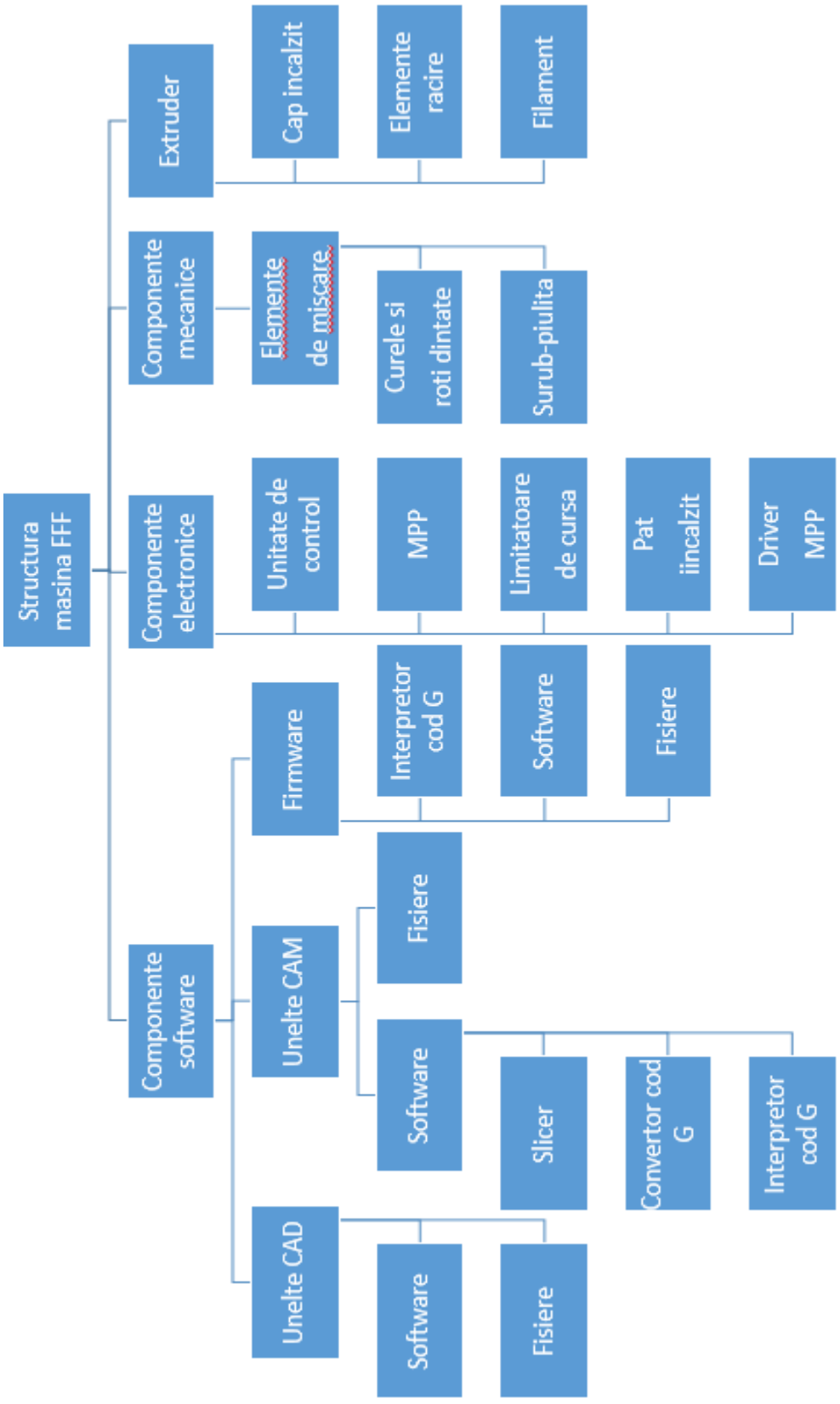


Fig. 3.1. Schema componentelor unei mașini de fabricație aditivă prin procedeul FFF

CAP. 5 PARAMETRI DE PROCES

5.1 PARAMETRI DE PROCES

În timpul procesului de fabricație aditivă diverși parametri influențează precizia dimensională și proprietățile mecanice ale pieselor fabricate [48], precum și durata și costul fabricării piesei. După natura lor, acești parametri pot fi împărțiți în diferite categorii, care vor fi abordate în cele ce urmează:

- parametri de mediu
  - temperatura ambiantă;
  - umiditate;
- poziționarea și orientarea pieselor pe masa mașinii;
- extruderul ales pentru fabricarea piesei, pentru mașinile de fabricație aditivă cu 2 sau mai multe extrudere;
- parametri specifici procesului de fabricație aditivă prin FFF:
  - diametrul filamentului utilizat;
  - diametrul duzei de extrudare;
  - temperatura extruderului;
  - temperatura mesei mașinii și a incintei (acolo unde mașina este dotată cu încălzire pentru aceste componente);
  - viteza de depunere;
  - accelerațiile axelor de mișcare;
  - răcirea forțată a piesei fabricate;
  - grosimea stratului depus;
  - lățimea stratului depus;
  - distanța de degajare a materialului atunci când fluxul de material topit trebuie oprit;
- parametri specifici structurii piesei realizate:
  - numărul de perimetre prin care se realizează suprafața exterioară a piesei;
  - numărul de straturi de material pentru suprafețele exterioare orizontale ale piesei;
- parametri referitori la modul de depunere a materialului pentru realizarea piesei:
  - durata minimă de depunere a unui strat de material;
  - modul de realizare a pereților subțiri;
  - modul de realizare a coloanelor cilindrice;
  - modul de realizare a “insulelor” (suprafețe geometrice distincte din cadrul aceluiași strat de material).

CAP. 6 DETERMINAREA MATERIALELOR NECESARE PENTRU CONSTRUCȚIA UNUI EXTRUDER PENTRU MATERIALE CU TEMPERATURI ÎNALTE DE TOPIRE PE BAZA ANALIZEI TERMICE CU ELEMENTE FINITE

6.1 DEFINIREA ANALIZEI CU ELEMENTE FINITE

Mașina de fabricație aditivă prin FFF QidiTech Avatar IV utilizează două extrudere echipate cu motoare pas cu pas, cu alimentare cu filament de material prin angrenare directă cu ajutorul unei roți zimțate și al unui mecanism de tensionare cu arc.

Topirea filamentului pentru extrudare și depunere se realizează prin încălzirea unui bloc din aluminiu folosind un cartuș ceramic cu o putere de 40 W. Căldura este transferată prin conducție unei duze de extrudare realizată din alamă, cu diametrul minim al găurii de 0.4 mm. Pentru a reduce consumul de energie și variațiile de temperatură, blocul din aluminiu este învelit în izolație termică din bandă kapton. Monitorizarea temperaturii este făcută cu un termistor NTC 3950 cu o rezistență de 100 kΩ. Reducerea temperaturilor din afara zonei de topire se face prin două mecanisme:

– un tub din teflon (PTFE), un material cu o conductivitate termică redusă poziționat în interiorul tubului intermediar, cu rolul de a reduce viteza de propagare a temperaturii;

– un ventilator care răcește prin convecție forțată un radiator cu lamele fabricat din aluminiu.

În cadrul proiectului de doctorat, duza extruderului mașinii de fabricație aditivă trebuie să atingă temperaturile necesare topirii și extrudarii materialelor pentru care sunt efectuate determinări experimentale.

Pentru fabricația aditivă cu material PEEK sau PPSU, duza extruderului trebuie să fie menținută la temperaturi de peste 390 ºC. Din start, putem face observația că modul de monitorizare a temperaturii cu termistor NTC nu este potrivit aplicației, fiind necesară schimbarea acestui sistem cu senzori de temperatură PT100 sau cu termocuplă tip K. Aceste variante pot efectua măsurători precise în domeniul de temperatură 200 ... 400 °C.

Pentru a analiza performanțele termice ale celorlalte componente, am recurs la o analiză cu elemente finite a temperaturilor componentelor extruderului atinse în timpul procesului de fabricație.

Designul extruderului și al analizei cu elemente finite a fost inițial validat analizând performanțele extruderului în parametrii recomandați de către producător, pentru material tip ABS. Apoi, am recurs la analiză termică pentru cazul în care elementul ceramic de încălzire ridică temperatura duzei până la 400 ºC, temperatura necesară extudarii materialelor care fac scopul activităților cercetarii doctorale. Ulterior, întrucât singurul parametru de răcire care poate fi reglat fără modificarea structurii mecanice a extruderului este viteza fluxului de aer generat de ventilator, analiza termică a fost repetată cu diferite valori ale răcirii generate de convecția forțată cu aer [34].

Comportamentul termic al extruderului în timpul procesului de fabricație aditivă rezultă din combinația a două mecanisme de transfer termic. În primă fază, duza de extrudare este încălzită de către cartușul ceramic integrat în blocul de aluminiu. Ulterior, căldura este disipată din corpul extruderului prin convecție forțată. O analiză cu elemente finite a fost proiectată pentru a analiza performanța termică a extruderului în timpul procesului de extrudare, în funcție de viteza aerului generat de ventilatorul extruderului [68]. Modelul virtual 3D a fost realizat în pachetul software SolidWorks 2011 (Fig. 6.2).

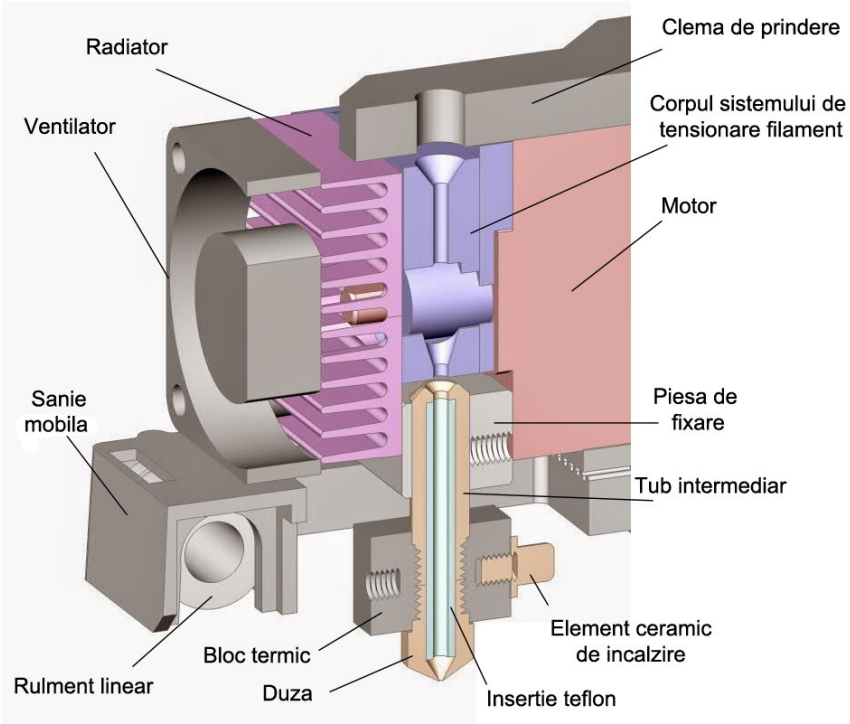


Fig. 6.2. Secțiune prin modelul virtual 3D al saniei mobile pe care este fixat extruderul

Acest model 3D a fost simplificat prin eliminarea filetelor și a teșiturilor mici, si importat în modulul de simulare termică al aceluiași pachet software.

Ansamblul este alcătuit din 6 componente supuse analizei termice (Fig. 6.3), după cum urmează:

1. Blocul termic realizat din aluminiu AW 3003-H18, în care se regăsesc 2 găuri cilindrice, una pentru cartușul ceramic de încălzire, iar cea de-a doua pentru termistor;
2. Duza de extrudare (alamă EN CW614N);
3. Tubul intermediar din oțel;
4. Tubul de încetinire a transferului termic din teflon (PTFE);
5. Piesa de fixare a extruderului (aluminiu AW 3003-H18);
6. Radiatorul cu lamele (aluminiu 6063).

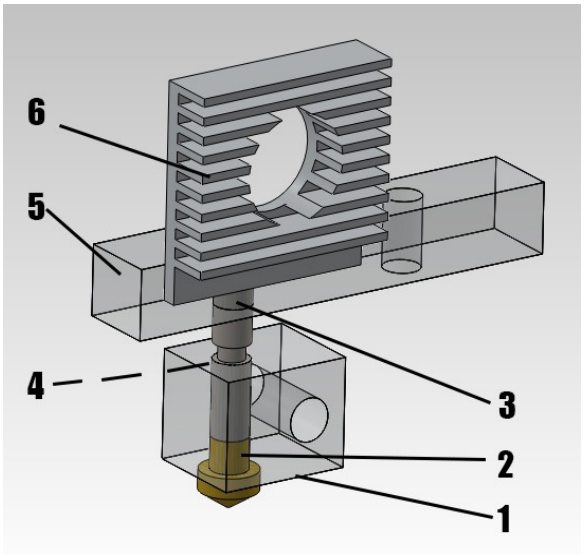


Fig. 6.3. Modelul virtual simplificat supus analizei termice

În cazul pieselor solide, analiza termică rezolvă ecuația de energie pentru fiecare nod

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}, \tag{6.1}$$

unde C_p este capacitatea calorică la presiune constantă;
k este conductivitatea termică,
Q este fluxul de căldură.

Condițiile stabilite în cadrul analizei termice (Fig. 6.4):

– Toate domeniile declarate în cadrul analizei termice sunt considerate izolate termic de mediul inconjurator; singurul element care introduce energie în sistem este considerat elementul ceramic de încălzire;

– Energia este scoasă din sistem prin fenomenul de convecție;

– Contactul dintre aer și peretii extruderului ia în considerare condiția "no-slip", ceea ce înseamnă că viteza aerului este egală cu zero la suprafața de contact;

– Deși ventilatorul nu este inclus în model, influența acestuia este inclusă în analiza termică prin variabila de transfer termic prin convecție. În cazul analizei comportamentului la temperatură înaltă, au fost analizate 3 valori ale vitezei aerului date de ventilator prin considerarea a 3 valori pentru variabila de transfer termic prin convecție: 25, 50, respectiv 100 W/(m^2 K) [57];

– Pentru piesa de fixare din aluminiu și suprafața expusă a tubului intermediar, precum și pentru suprafața cilindrică interioară a tubului de încetinire a transferului termic, este luat în considerare un factor de transfer termic prin convecție liberă cu aerul de 25 W/(m^{2}K);

– Întrucât blocul termic este izolat folosind banda Kapton, pierderile de energie prin contactul cu mediul sunt neglijate; în modelul analizat, blocul termic este considerat izolat;

– Energia termică este introdusă în sistem prin suprafața cilindrică în care este poziționat elementul ceramic de încălzire. O temperatură constantă a fost declarată pentru această suprafață, după cum urmează:

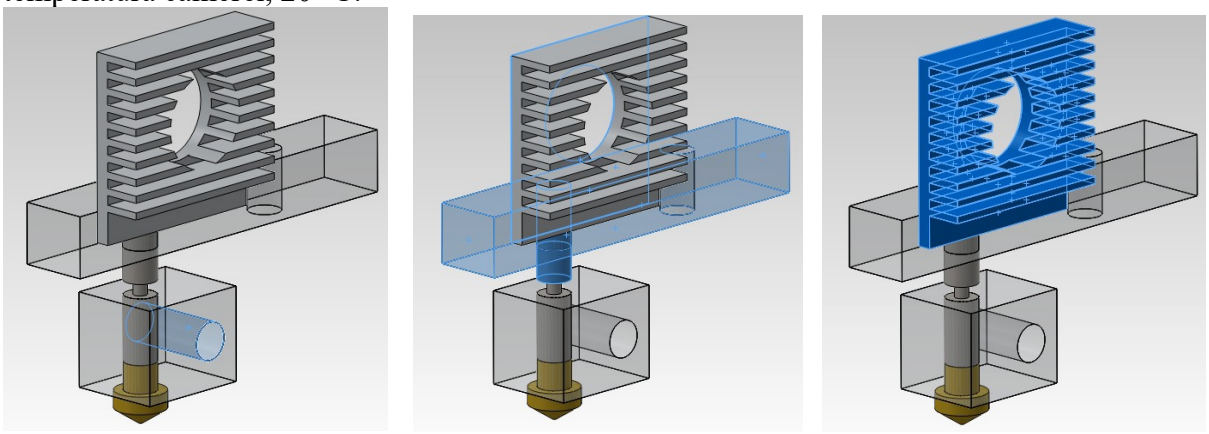
  – pentru analiza de validare a modelului virtual , t = 230 °C

  – pentru analiza comportamentului la temperatură înaltă, t = 400 °C

– Condițiile inițiale:

  – presiune constantă de 1 atm.

  – temperatura aerului ce vine în contact cu suprafața extruderului este temperatura camerei, 20 °C.



a) b) c)

Fig. 6.4. Aplicarea încărcărilor termice a) Temperatura constantă, b) Convecție liberă; c) Convecție forțată

Discretizarea componentelor a fost facută cu setarea Fine, stabilind dimensiunea elementelor minime de 0.1 mm. Dimensiunea maximă a elementelor este de 1 mm.

6.2 REZULTATELE ANALIZEI CU ELEMENTE FINITE

În urma analizei termice cu elemente finite (Fig. 6.6), se poate observa că temperaturile în cazul analizei de validare se încadrează în limitele normale. Temperatura maximă atinsă de tubul din teflon (Fig. 6.7) este de 228.31 °C, sub limita de 250 °C.

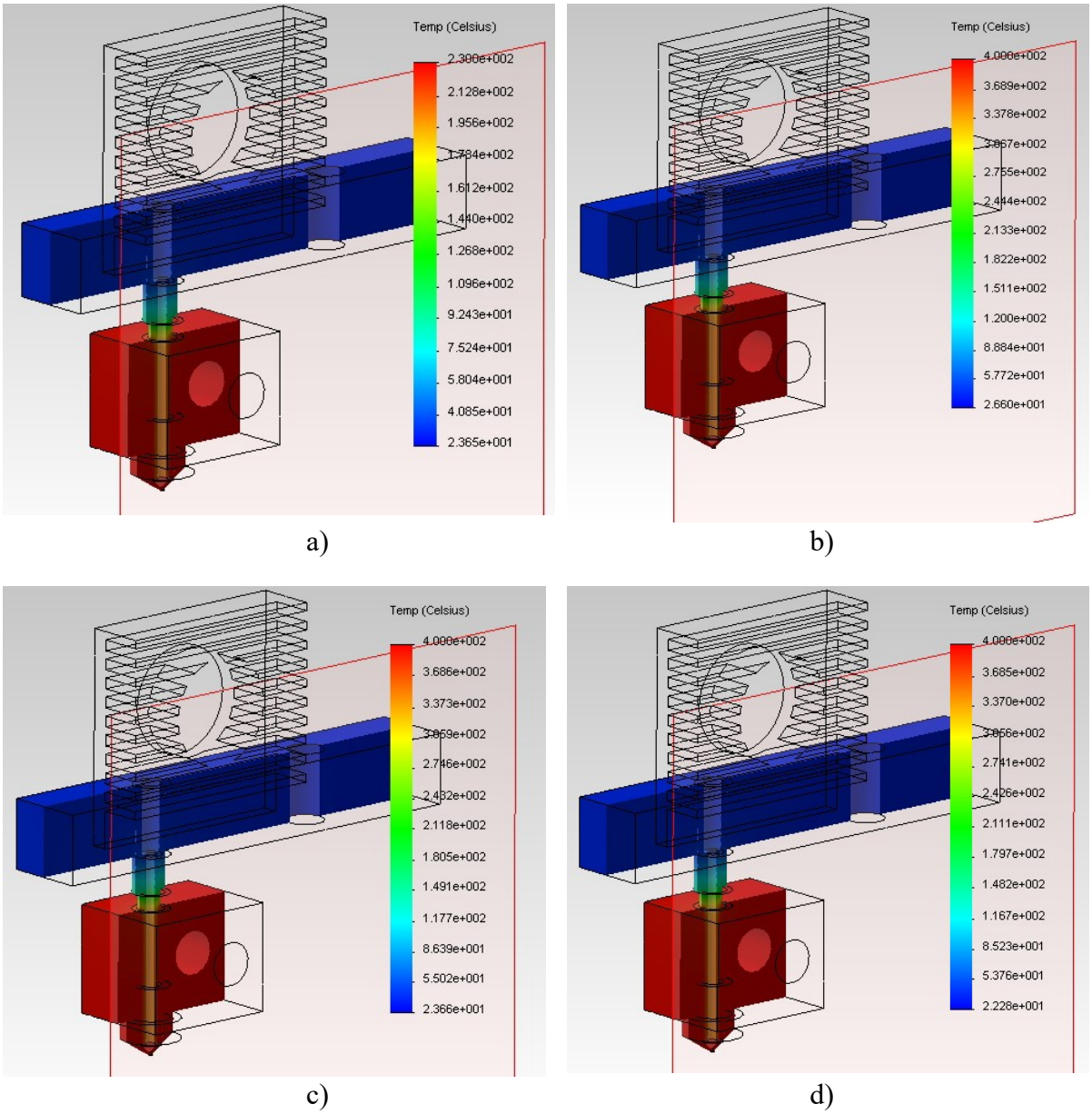


Fig. 6.6. Rezultatele analizei cu elemente finite: a) 230 °C, cu ventilatorul la turație maximă; b) 400 °C, cu ventilatorul oprit; c) 400 °C, cu ventilatorul la turație medie; d) 400 °C, cu ventilatorul la turație maximă.

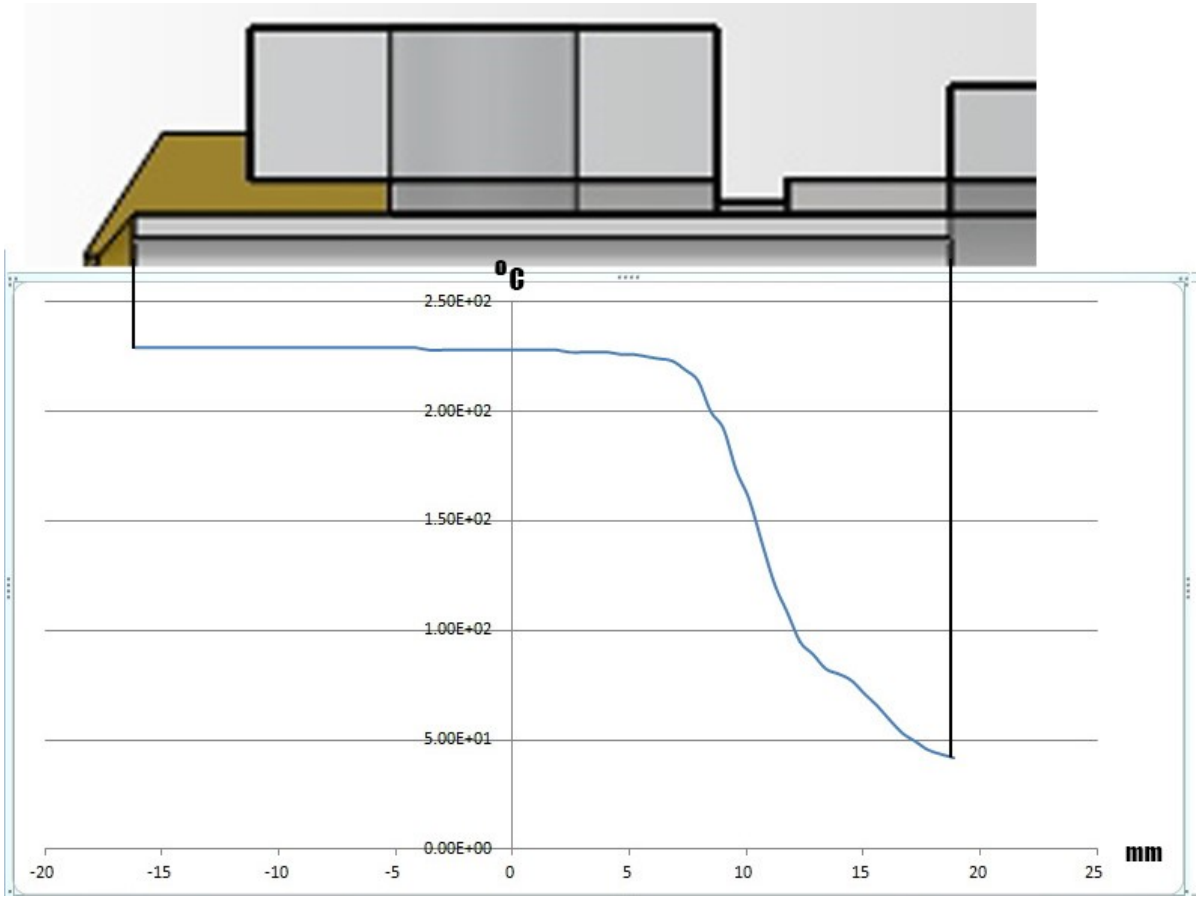


Fig. 6.7. Distribuția temperaturii de-a lungul tubului de teflon în cazul analizei de validare

În urma analizei la temperatură înaltă (Fig. 6.8), în care blocul de aluminiu în care este poziționat cartușul ceramic de încălzire a fost adus la temperatura de 400 °C, se poate observa că temperatura tubului cu rol de încetinire a transferului termic a trecut peste limita de 250 °C în peste 72% din volumul tubului. De asemenea, se poate observa că impactul creșterii vitezei ventilatorului este mic, întrucât acesta este poziționat la o distanță mare de zona de topire [86].

Datele experimentale arată că înlocuirea radiatorului cu o alta variantă constructivă mai eficienta nu ar produce schimbari semnificative [70].

O alta problemă este reprezentată de temperatura atinsă de blocul termic din aluminiu. Conform datelor experimentale disponibile, rezistența mecanică a aluminiului AW-3003-H18 scade de la 190 MPa la temperatura camerei de 20 °C la numai 21 MPa la temperatura de 400 °C.

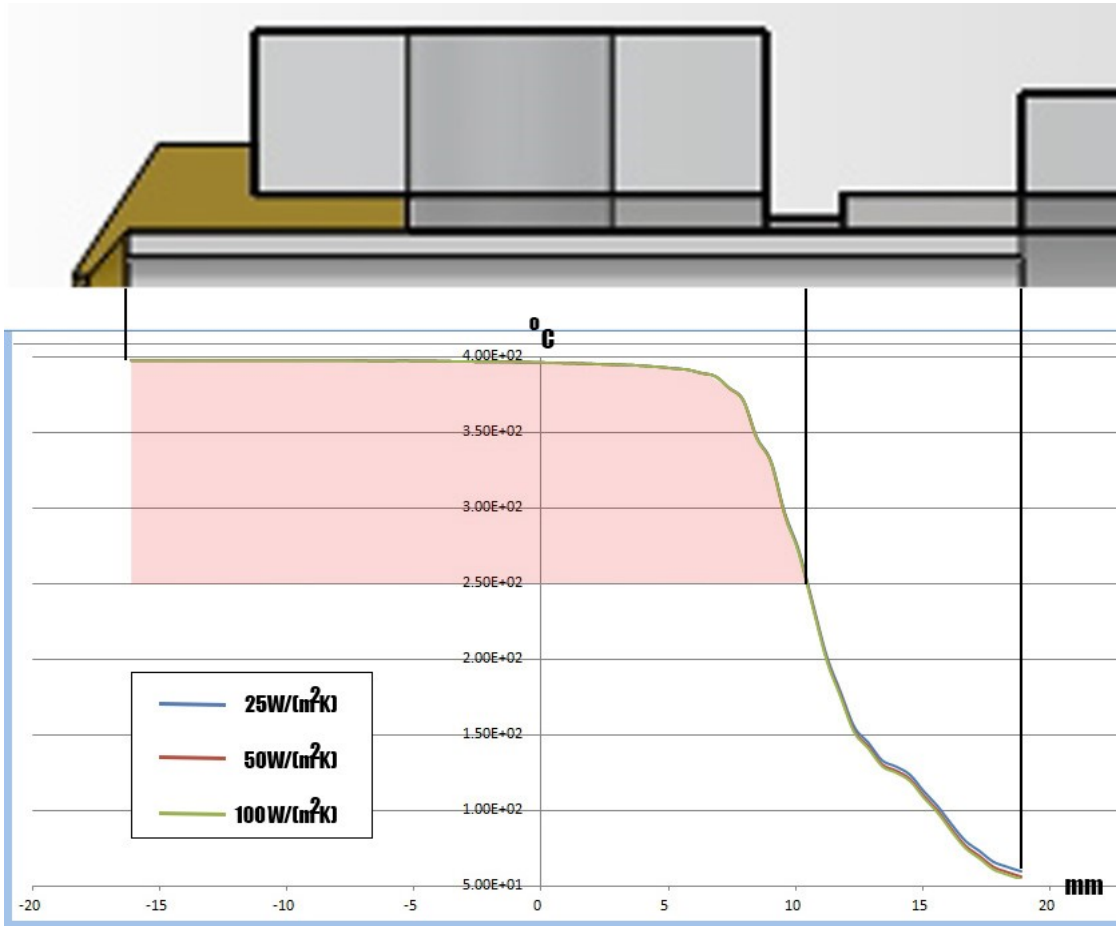


Fig. 6.8. Distribuția temperaturii de-a lungul tubului de teflon în cazul analizei la temperatura înaltă

De asemenea, duza din alamă EN CW614N depășește temperatura maximă de operare continuă, la 400 °C prezentând o rezistența mecanică de 51 MPa.

Celelalte componente, respectiv piesa de fixare din aluminiu AW-3003-H18, radiatorul din aluminiu 6063 și tubul intermediar din oțel inox s-au menținut sub temperaturile maxime de operare continuă.

În cele ce urmează, s-a repetat analiza termică după înlocuirea componentelor incompatibile conform Tabelului 6.6. și a Fig. 6.10.

Tabelul 6.6. Componente revizuite

Nr. Crt.	Componentă	Modificare
1	Duză	Schimbarea materialului din alamă EN CW614N în oțel inox
2	Bloc termic	Schimbarea materialului din aluminiu AW-3003-H18 în oțel inox
3	Tub de incetinire a transferului termic din teflon	Cele două componente au fost reproiectate într-o singură componentă, materialul nou ales fiind oțel inox
4	Tub intermediar	

După repetarea analizei termice se poate observa că toate componenentele se încadrează în limitele de temperatură (Fig. 6.11, Tabelul 6.7).

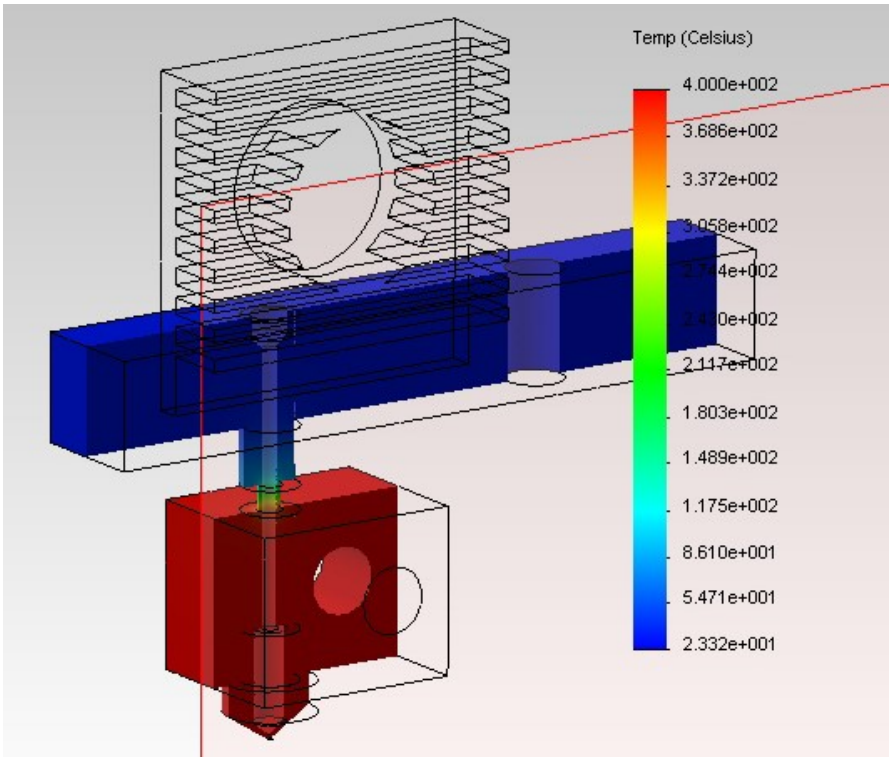


Fig. 6.11. Rezultatul analizei termice cu elemente finite dupa revizuirea componentelor

Tabelul 6.7. Temperaturi maxime atinse după reproiectarea componentelor:

Nr. Crt.	Componentă	Temperatura maximă [ºC]
1	Bloc termic	400
2	Duza de extrudare	399.21
3	Tub intermediar	398.67
4	Piesa de fixare	57.31
5	Radiator cu lamele	39.84

6.3 DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TEMPERATURILOR DE OPERARE A UNUI EXTRUDER PENTRU FABRICAȚIE ADITIVĂ CU DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT

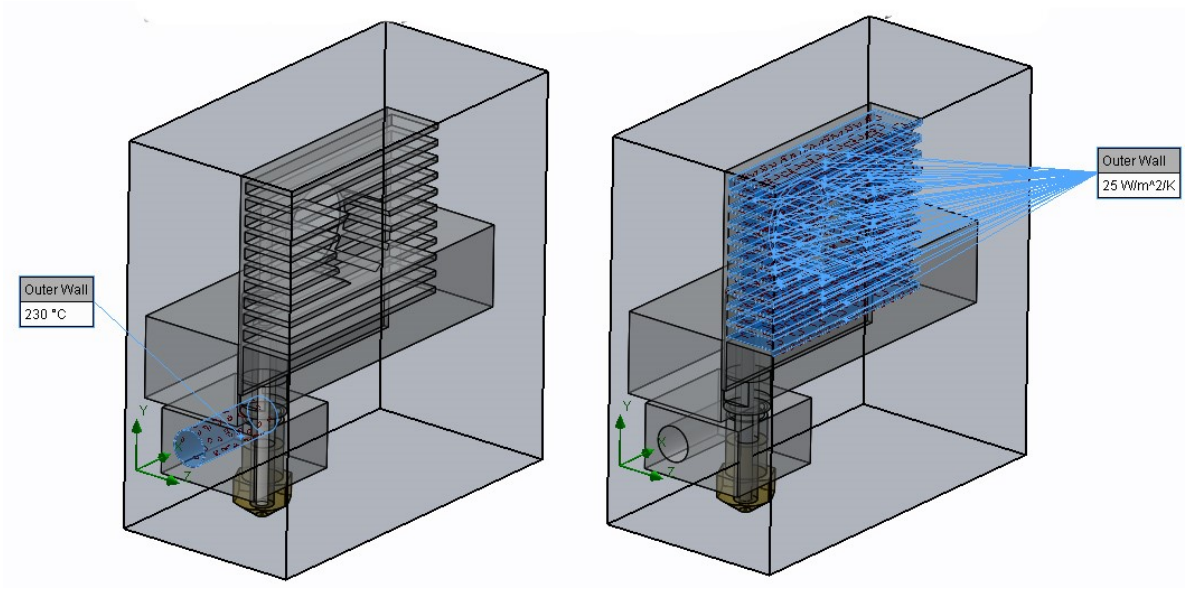
În prima parte a acestui capitol a fost tratată problema materialelor folosite la realizarea extruderului unei mașini de fabricație aditivă prin depunere de filament topit. Comportamentul termic al unui extruder model MK10 a fost analizat folosind o metodă de analiză cu elemente finite (analiză termică statică) și concluzii au fost formulate în ceea ce privește comportamentul extruderului la temperaturi cuprinse între 230 ºC și 400 ºC. În cele ce urmează va fi prezentată analiza termică tranzitorie, precum și validarea experimentală a rezultatelor obținute în urma analizei cu elemente finite. Procesul a fost repetat pentu un nou tip de extruder a cărui construcție ține cont de concluziile formulate în urma analizei termice statice anterioare.

Pentru determinarea temperaturilor s-au utilizat senzori de temperatură de tip termistor. Aceștia sunt elemente de circuit care își modifică rezistența în funcție de temperatură. Tipul termistorilor utilizați este NTC 3950, cu o rezistentă de 100 kΩ la temperatura de 21 ºC. Aranjamentul experimental constă în 5 termistori conectați la un circuit de măsură și un micro-controller tip Arduino. După fixarea senzorilor pe extruder, imprimanta a fost utilizată la printarea unei piese-test a cărei proces de fabricație a durat 15 minute, timp suficient pentru ca

piesele componente ale extruderului să atingă echilibrul termic. Temperaturile rezultate în urma măsurătorilor și a prelucrării de date au fost salvate în fișiere text, de unde au fost încărcate în Microsoft Excel pentru crearea graficelor.

Analiza cu elemente finite a extruderului MK10 a fost realizată folosind SolidWorks Flow Simulation și încorporează elemente de analiză termică tranzitorie și de dinamica fluidelor. Condițiile specificate în cadrul analizei cu elemente finite sunt:

- temperatura 230 °C pentru suprafața cilindrică în care este fixat cartușul ceramic (Fig. 6.14a)
- convecție termică 25 W/m^{2}K pentru suprafața lamelară a radiatorului (Fig. 6.14b); aerul care lovește aceasta suprafața are temperatura camerei, 25 °C.
- convecție termică 20 W/m^{2}K pentru suprafața expusă a tubului intermediar; aerul care intra în contact cu aceastî suprafață are temperatura de 45 °C.
- fluxul de fluid (aer) setat ca fiind lamelar și turbulent;
- temperatura inițială a pieselor extruderului este temperatura camerei, 25 °C
- durata totala a analizei termice tranzitorii este de 900 de secunde, cu calculul soluțiilor intermediare 1 dată pe secundă.



a) b)

Fig. 6.14. a) Temperatură cartuș ceramic; b) Transfer termic pe suprafața radiatorului

Rezultatele analizei termice cu elemente finite, precum și măsurătorile experimentale efectuate pentru extruderul tip MK10 sunt prezentate în Fig. 6.15.

Poziția senzorilor de temperatură și valorile experimentale măsurate cu ajutorul acestora se regăsesc în Tabelul 6.10.

Tabelul 6.10. Valori experimentale măsurate pentru extruderul MK10

Nr. Senzor	Plasament	Distanță de vârful duzei [mm]	Temperatura stabilă [°C]
1	Partea inferioară expusă a tubului intermediar	19,0	205,62
2	Partea superioară expusă a tubului intermediar	25,0	135,52
3	Centrul piesei de fixare	32,5	138,17
4	Partea inferioară a radiatorului	40,0	125,12
5	Centrul radiatorului	55,0	122,76

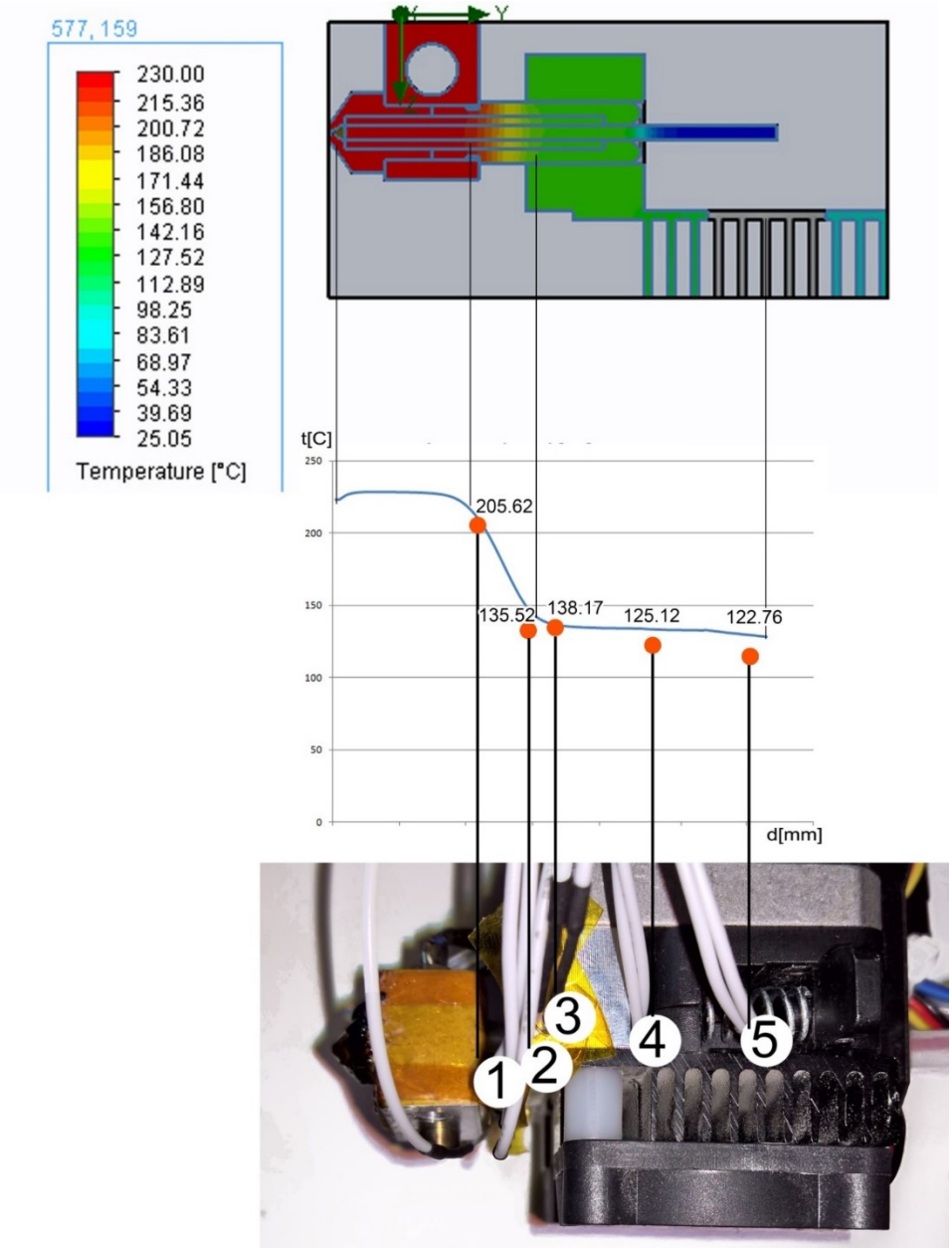


Fig. 6.15. Măsurători experimentale ale temperaturii extruderului MK10

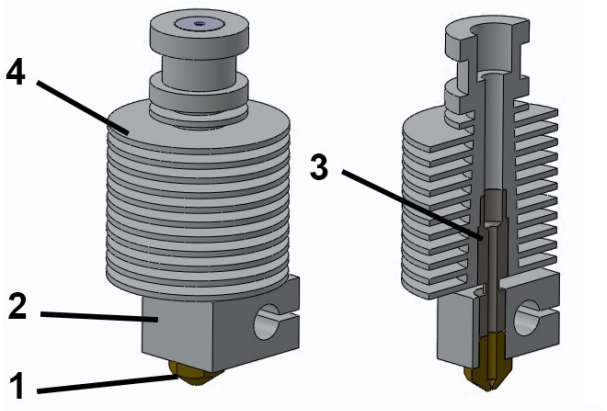
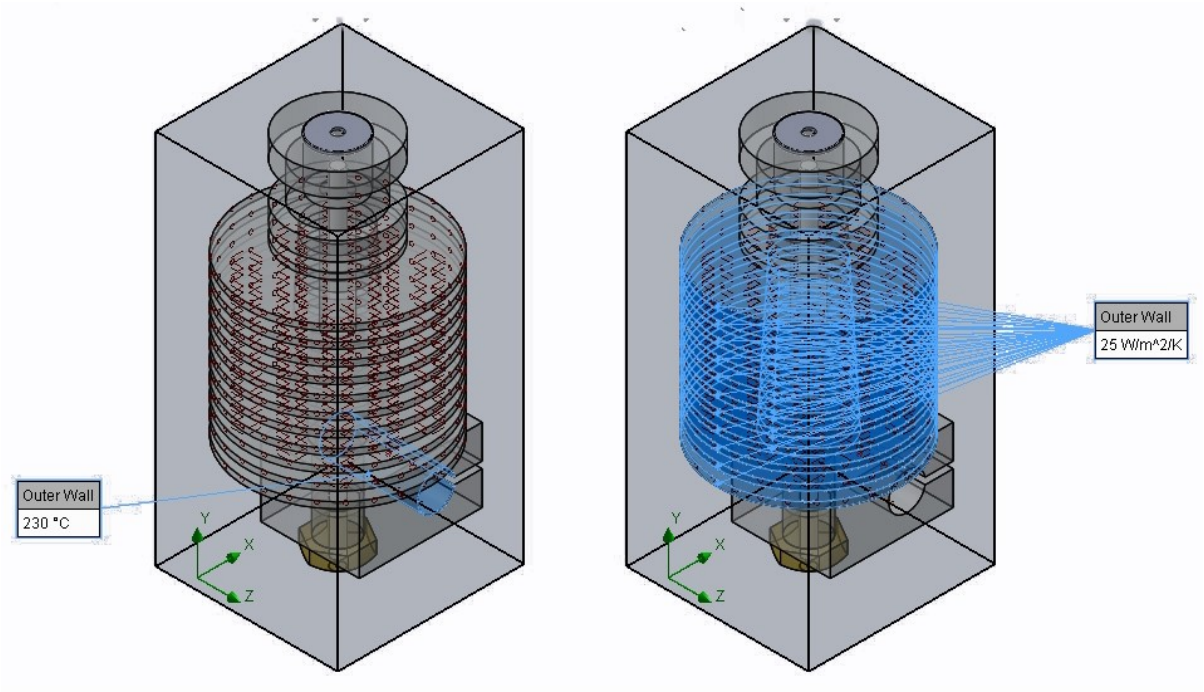


Fig. 6.16. Componentele variantei de extruder îmbunătățite. 1) duza de extrudare (alamă EN CW614N); 2) bloc termic (aluminiu AW-3003-H18); 3) tub conexiune (SS304); 4) radiator cilindric (aluminiu 6063).

Condițiile specificate în cadrul analizei cu elemente finite sunt:

- geometria și materialele specificate în figura 6.16;
- temperatura 230 ^{o}C pentru suprafata cilindrica în care este fixat cartusul ceramic (Fig. 6.17a)
- convecție termică 25 W/m^{2}K pentru suprafața lamelară a radiatorului (Fig. 6.17b); aerul care lovește această suprafață are temperatura camerei, 25 ^{o}C.
- fluxul de fluid (aer) setat ca fiind lamelar și turbulent;
- temperatura inițială a pieselor extruderului este temperatura camerei, 25 ^{o}C
- durata totală a analizei termice tranzitorii este de 900 de secunde, cu calculul soluțiilor intermediare 1 data pe secundă.



a) b)

Fig. 6.17. a) Definire temperatură cartuș ceramic; b) Definire transfer termic pe suprafața radiatorului

Rezultatele analizei termice cu elemente finite, precum și măsurătorile experimentale efectuate pentru extruderul executat integral din metal sunt prezentate în Fig. 6.18.

Poziția senzorilor de temperatură și valorile experimentale măsurate cu ajutorul acestora se regăsesc în Tabelul 6.12.

Tabelul 6.12. Valori experimentale măsurate pentru extruderul din metal

Nr. Senzor	Plasament	Distanță de vârful duzei [mm]	Temperatura stabilă [^{o}C]
1	Partea inferioară expusă a tubului intermediar	16,5	223,72
2	Partea superioară expusă a tubului intermediar	18,5	62,97
3	Treimea inferioară a radiatorului	21	62,54
4	Centrul radiatorului	28,5	53,20
5	Treimea superioară a radiatorului	38,5	49,33

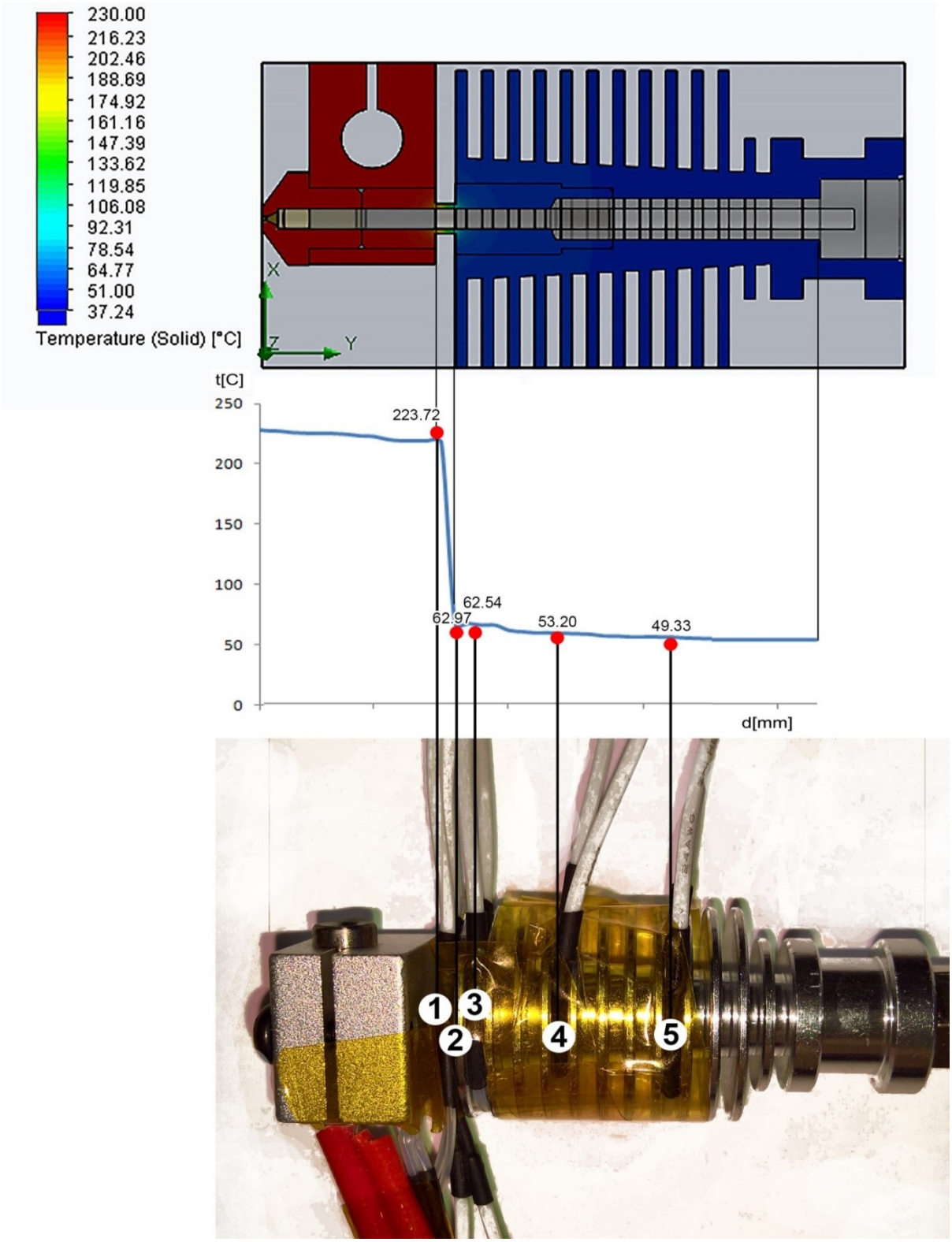


Fig. 6.18. Măsurători experimentale ale temperaturii extruderului realizat din metal

6.4 ANALIZA TERMICĂ CU ELEMENTE FINITE A UNEI PIESE FABRICATE PRIN DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT

Pentru a determina influența parametrilor de proces asupra comportamentului termic al pieselor fabricate prin depunere de filament topit a fost efectuată o analiză cu elemente finite.

Literatura de specialitate prezintă diferite metode [71, 72], de simulare termică a procesului de fabricatie aditivă. Majoritatea abordărilor utilizează discretizarea individuală a filamentelor de material depuse în diverse poziții (lateral, deasupra) și analizează distribuția temperaturilor în funcție de poziția și momentul depunerii lor [73]. În timp ce această abordare produce rezultate precise la nivel de filamente individuale, generalizarea metodei pentru simularea comportamentului unei piese complete prezintă dificultăți [74]:

– în timpul procesului de fabricație aditivă, poziția depunerii filamentelor variază în funcție de suprafața stratului depus.

– direcția de depunere diferă în funcție de parametri de proces prestabiliți, specific programului software care generează traiectoria de depunere.

În cele ce urmează este propusă o altă abordare, și anume o analiză simplificată, la nivel macro, în care piesa analizată este fabricată strat cu strat, iar analiza cu elemente finite se face pentru fiecare strat individual. Procesul de simulare este executat în următorii pași (Fig. 6.19):

1. Stabilirea parametrilor de proces
    - viteza de depunere;
    - înalțimea stratului de material;
    - lățimea filamentului de material depus;
    - temperatura extruderului;
    - temperatura patului încălzit și a incintei (temperatura aerului).
2. Secționarea piesei în straturi, ținând cont de înălțimea stratului de material
3. Ținând cont de viteza de depunere, viteza de deplasare, lățimea filamentului de material depus, se aproximează timpul necesar depunerii unui strat. Gradul de umplere a volumului interior al piesei este considerat 100%.
4. Ținând cont de temperatura extruderului, se aproximează evoluția termică a stratului superior de material depus.
5. Temperatura stratului de material aflat la bază este aproximată ca fiind egală cu temperatura patului încălzit.
6. După setarea parametrilor termici, se execută analiza termică dinamică pentru primele două straturi depuse, unde temperatura inițială a stratului inferior este cea stabilită la pasul 5, iar temperatura inițială a stratului superior este cea determinata la pasul 4.
7. Analiza termică tranzitorie este rulată pentru o perioada de timp egală cu timpul necesar depunerii unui strat determinat la punctul 3.
8. Temperaturile rezultate în urma analizei dinamice sunt salvate și sunt considerate ca temperaturi inițiale pentru urmatoarea simulare. Se repetă procesul până când sunt analizate toate straturile de material.

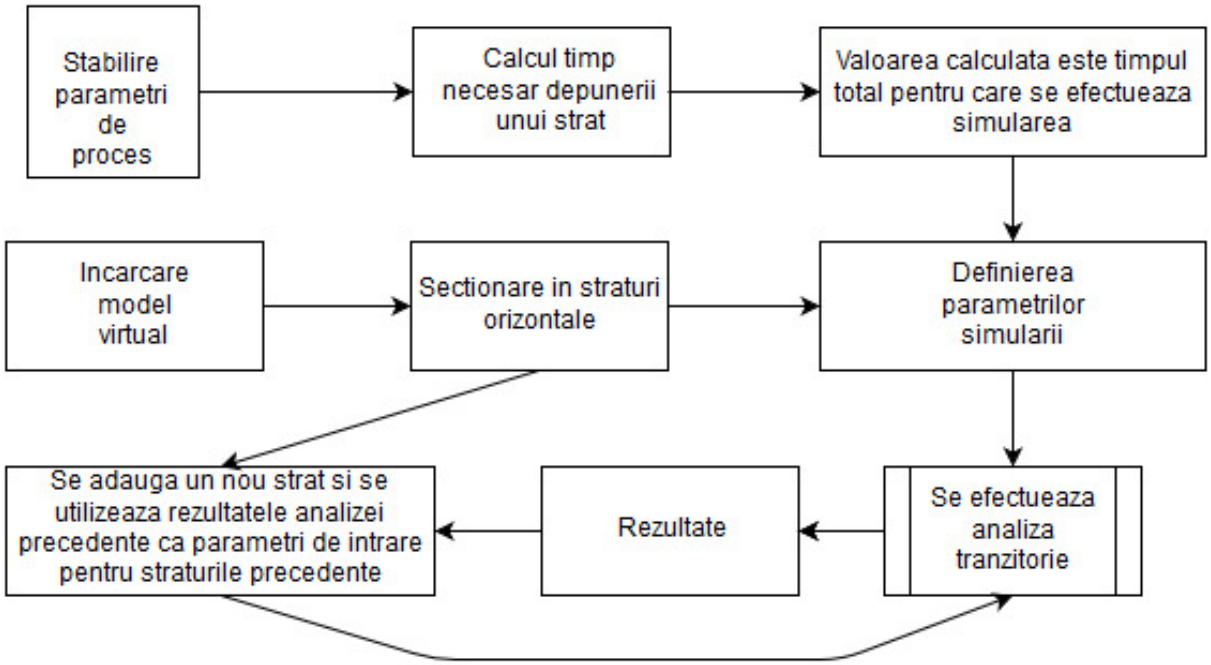


Fig. 6.19. Diagrama etapelor analizei termice

Piesa testată este un paralelipiped cu dimensiunile 20 × 20 × 40 mm, secționat în 200 straturi de material, fiecare cu o grosime de 0.2 mm. Utilizând estimările oferite de software-urile dedicate secționarii modelelor virtuale pentru fabricație aditivă s-a calculat timpul aproximativ de depunere a unui strat de material ținând cont de parametrii de proces: viteza de depunere 60 mm/s, lățimea filamentului depus 0.4 mm. Timpul calculat este de 20 secunde pentru fiecare strat depus. Prin urmare, timpul total al simulării este de 4000 secunde. Parametrii utilizați în cadrul analizei cu elemente finite se regăsesc în Tabelul 6.13.

Tabelul 6.13. Parametri termici utilizați în cadrul analizei cu elemente finite

Nr. Crt.	Parametru	Valoare
1	Conductivitate termică PLA	0.10 W/mK
2	Conductivitate termică ABS	0.16 W/mK
3	Conductivitate termică PETG	0.39 W/mK
4	Coeficient transfer termic aer	25 W/m^2K
5	Temperatură mediu ambiant cu incintă deschisă	25 °C
6	Temperatură mediu ambiant cu incintă închisă	45 °C
7	Temperatură extruder	190-230 °C
8	Temperatură masă încălzită	25-110 °C

În Fig. 6.20 sunt prezentate rezultatele analizei termice tranzitorii pentru primele 5 cicluri ale analizei și distribuția temperaturilor pentru fiecare dintre acestea, preluate în momentele de timp prezentate în Tabelul 6.14.

Tabelul 6.14.

Nr. Ciclu	Înălțime piesă [mm]	Timp analiză
1	1	1'40"
2	2	3'20"
3	3	5'00"
4	4	6'40"
5	5	8'20"

Din analiza termică tranzitorie se poate observa că temperatura straturilor depuse scade rapid în urma expunerii la mediul înconjurator la temperatura camerei. Răcirea piesei este mai accentuată spre suprafețle exterioare, în special în jurul muchiilor piesei. După finalizarea celui de-al doilea ciclu se poate observa că piesa s-a răcit suficient de mult încât cele mai ridicate temperaturi să fie înregistrate în jurul patului încălzit la 60 °C. La adăugarea straturilor ulterioare de material se observă formarea unei zone calde în interiorul piesei.

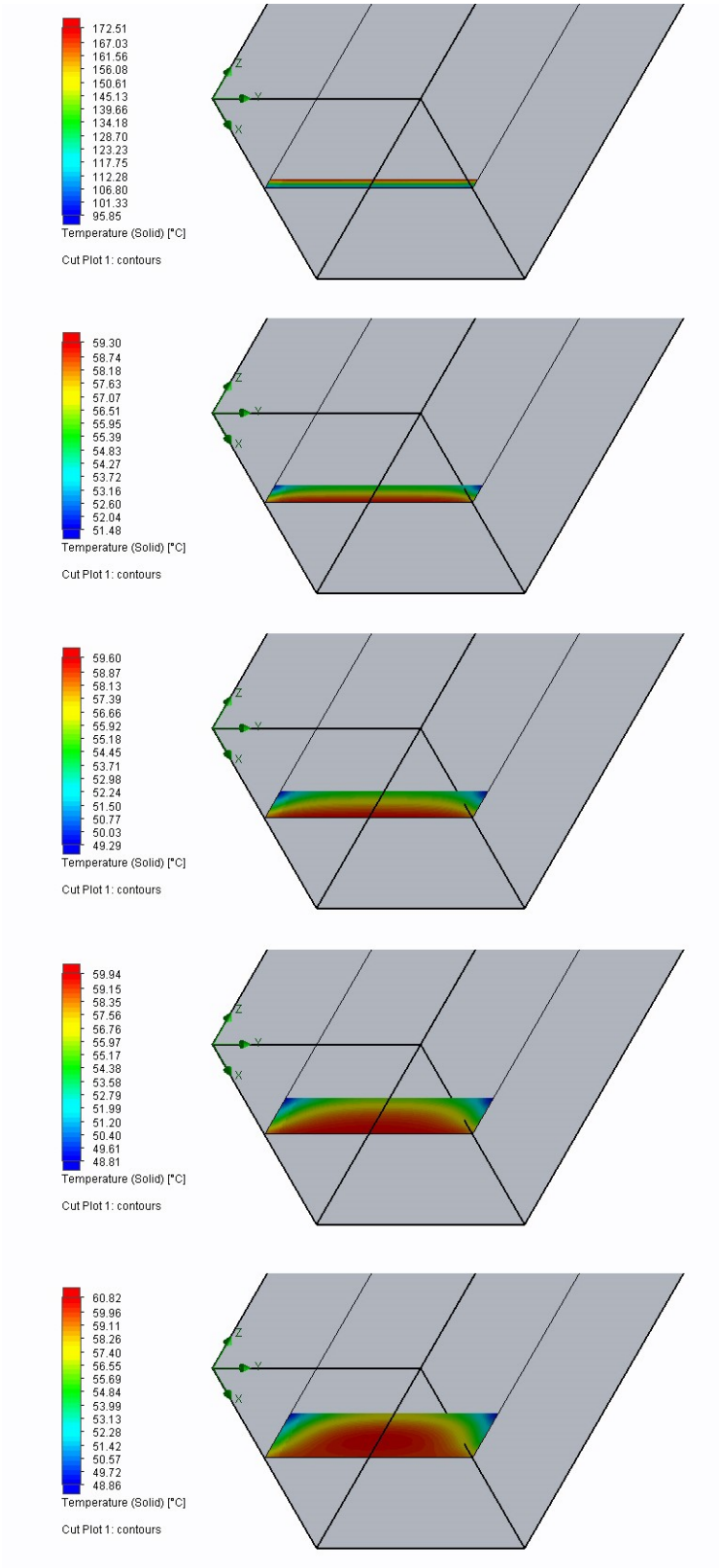


Fig. 6.20. Primele 5 cicluri ale analizei termice

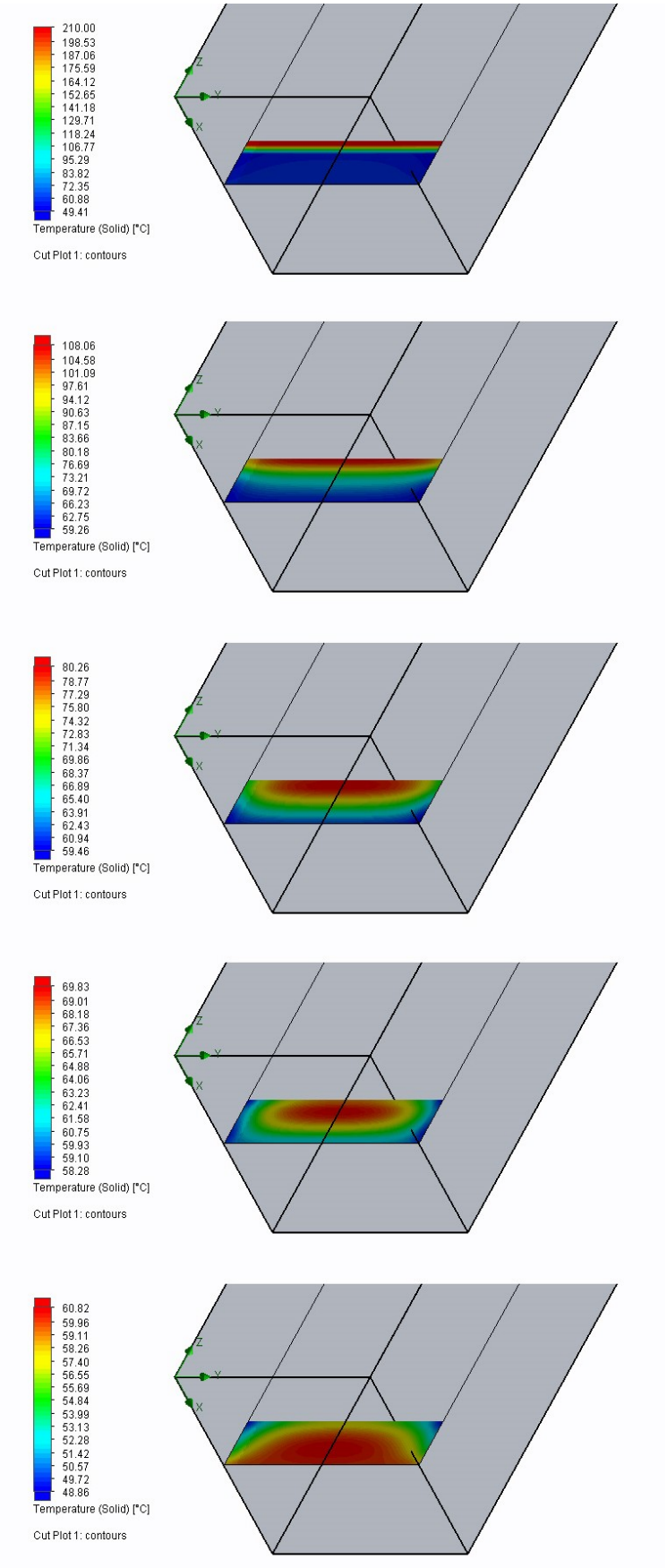


Fig. 6.21. Evoluția temperaturii în cel de-al 5-lea ciclu al analizei termice

În Fig. 6.21 este prezentata evoluția în timp a temperaturilor în cadrul aceluiași ciclu al simulării. Prima imagine reprezintă momentul t = 0 al depunerii unui nou strat de material, iar în imaginile alăturate se poate observa modul în care se distribuie căldura (Tabelul 6.15).

Tabelul 6.15

Nr. Ciclu	Înălțime piesă [mm]	Timp analiză
5	5	6'40"
5	5	7'00"
5	5	7'20"
5	5	7'40"
5	5	8'00"

De remarcat este faptul că temperatura din interiorul piesei ajunge la temperatura patului înainte de completarea ciclului și de depunerea stratului următor, în timp ce răcirea în zonele mai apropiate de suprafața este mai accentuată. Acest lucru indică prezența unor fluctuații de temperatură, ceea ce duce la acumularea tensiunilor interne. În partea superioară a piesei temperaturile scad sub temperatura patului încălzit la 60 °C, indicând o influenta redusă a patului încălzit pentru partea superioară a piesei, chiar și în cazul pieselor de dimensiuni reduse (z = 5 mm).

În Fig. 6.22 este prezentată situația piesei aflate într-un stadiu avansat al procesului de fabricație.

Prima imagine din cadrul secvenței reprezintă momentul t_0 al depunerii stratului de material z = 30 mm, iar imaginile ulterioare ilustrează modul de propagare al căldurii în piesă.

Tabelul 6.16

Nr. Ciclu	Inaltime piesa [mm]	Timp analiza
30	30	48'40"
30	30	49'00"
30	30	49'20"
30	30	49'40"
30	30	50'00"

După cum se poate observa, influența patului încălzit în acest punct al procesului de fabricație se reduce la partea inferioară a piesei, suprafețele laterale atingând temperatura de 31.56 °C.

Astfel, se poate concluziona că, începând cu o anumită distanță a stratului depus curent față de planul patului încălzit, efectul acestuia din urmă este prea scăzut pentru a justifica menținerea temperaturii sale la un nivel ridicat. Întrucât patul încălzit este unul dintre principalii consumatori de energie electrică ai unei imprimante 3D dotate cu un astfel de sistem, prin scăderea temperaturii acestuia începând cu un anumit punct al procesului de printare, se pot reduce semnificativ costurile de fabricație. Eficiența unei astfel de modificări este sporită în cazul pieselor înalte.

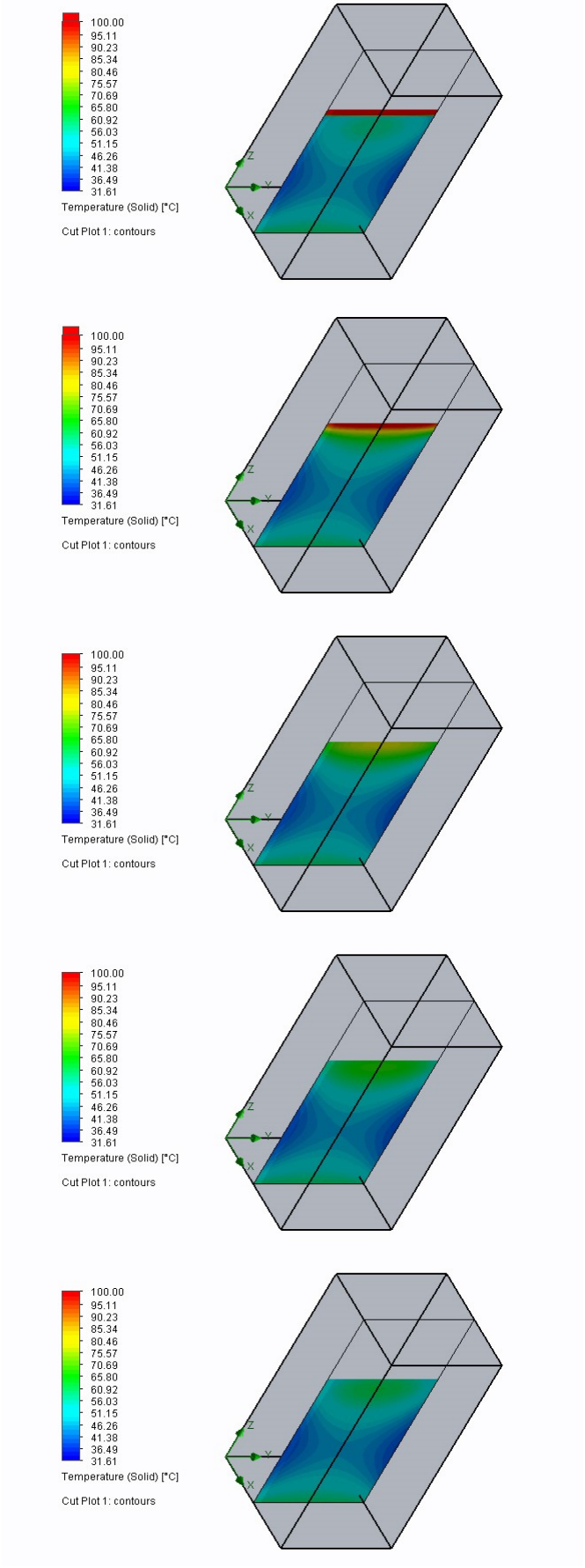


Fig. 6.22. Evoluția temperaturii în cel de-al 30-lea ciclu al analizei termice

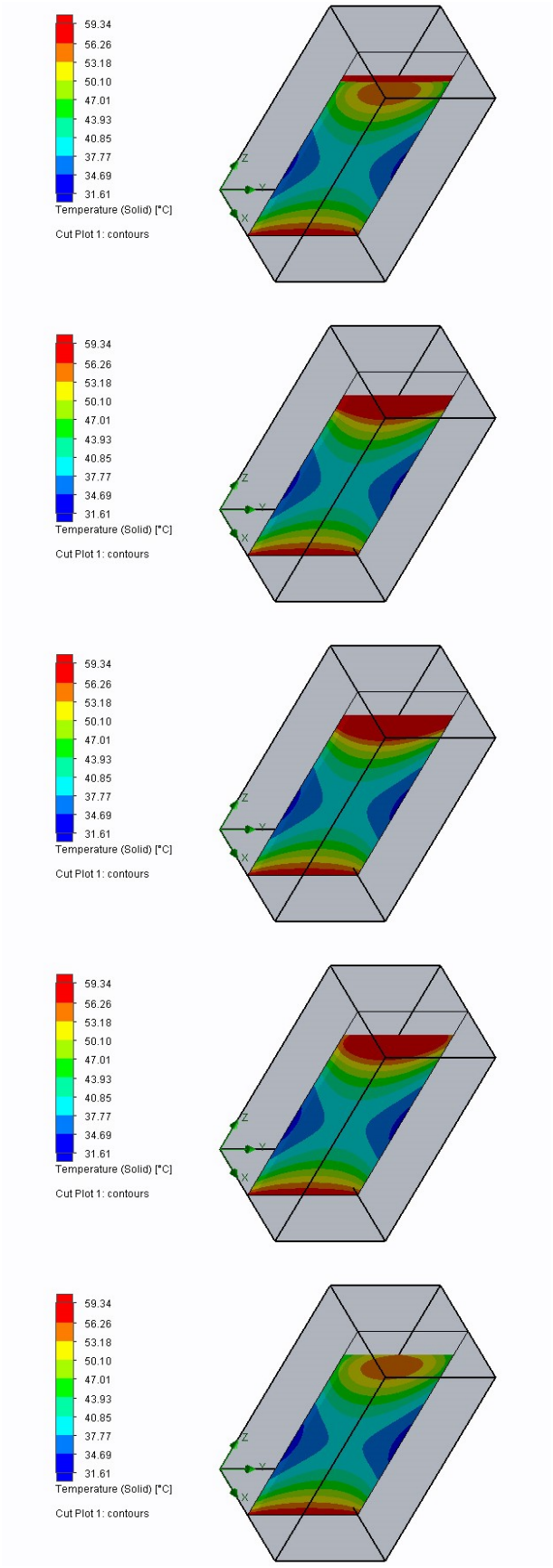


Fig. 6.23. Analiză termică: repartiția temperaturilor la depunerea unui strat la înălțimea piesei z = 35 mm

În Fig. 6.23 sunt prezentate 5 secvențe din cadrul simulării captate în momentul depunerii unui strat de material topit la distanța z = 35 mm de baza piesei (Tabelul 6.17).

Tabelul 6.17

Nr. Ciclu	Inaltime piesa [mm]	Timp analiza
35	35	58’20”
35	35	58’40”
35	35	59’00”
35	35	59’20”
35	35	59’40”

Scara graficelor în secțiune a fost fixată pentru a arăta temperaturi cuprinse între 31.61 ºC și 59.34 ºC, pentru a evidenția modul de propagare a căldurii.

6.5 MĂSURAREA EXPERIMENTALĂ A TEMPERATURII INTERIOARE A PIESELOR FABRICATE PRIN DEPUNERE DE FILAMENT TOPIT

Pentru validarea rezultatelor obținute pe baza modelului de analiză termică cu elemente finite descrisă anterior, precum și pentru identificarea influenței a diverși parametri termici asupra modului de propagare a căldurii în piesa fabricată, un număr de teste au fost efectuate, fabricând piese test de 20 × 20 × 40 mm din cele 3 materiale specificate anterior. Piesele test au fost prevăzute cu cate 5 alezaje cilindrice (Fig. 6.25) dispuse la 5 mm de baza piesei.

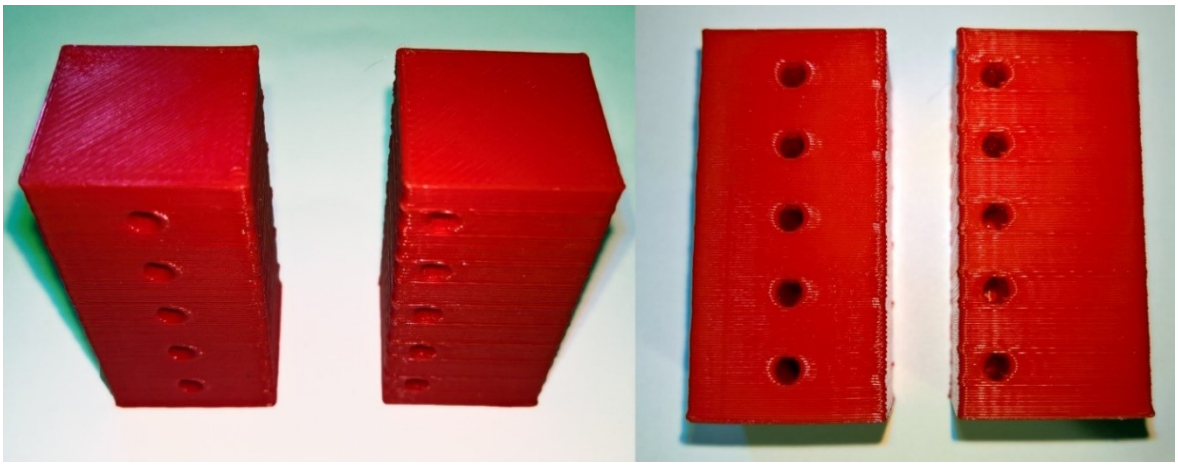


Fig. 6.25. Piese test fabricate pentru măsurarea experimentală a temperaturilor

Golurile au fost dispuse echidistant pe direcția verticală, la o distanță de 7,5 mm unul de celălalt. Două poziții în planul vertical au fost considerate, și anume: o poziție aflată în planul de simetrie a piesei și o poziție aflată la jumatatea distanței dintre planul de simetrie și suprafața exterioară a piesei. Tabelul 6.19 enumeră coordonatele punctelor a căror temperatură a fost determinată experimental. Punctul de origine al piesei este considerat intersecția planului frontal cu planul lateral stânga și planul de bază.

Tabelul 6.19. Coordonatele punctelor determinate experimental

Nr. Punct	Coordonate (X;Y;Z)
P1	(10;10;5)
P2	(10;10;12,5)
P3	(10;10;20)
P4	(10;10;27,5)
P5	(10;10;35)
P6	(5;10;5)
P7	(5;10;12,5)
P8	(5;10;20)
P9	(5;10;27,5)
P10	(5;10;35)

În timpul fabricarii, o data finalizat stratul care delimiteaza golul interior, în piesa au fost introdusi senzori de temperatura pentru a monitoriza procesul de racire a piesei (Fig. 6.26). Piesele au fost fabricate cu ajutorul unei imprimante 3D QidiTech Avatar IV dotată cu extruderul tip MK10. Extruderul și senzorii de temperatura folositi au fost descrisi în capitolul anterior.

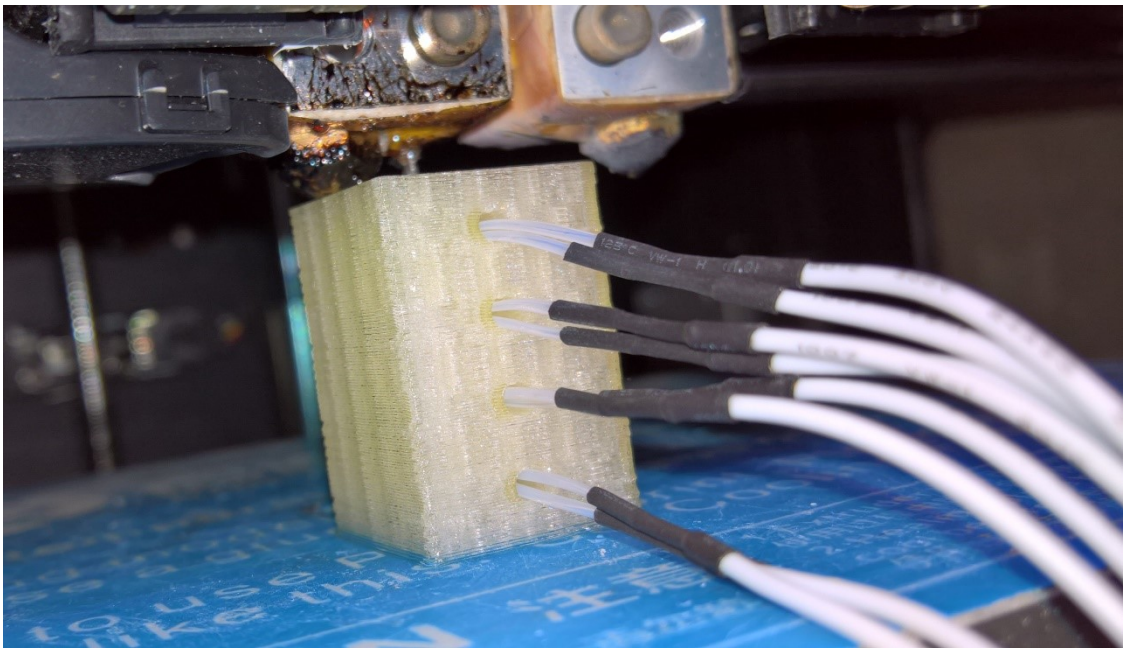


Fig. 6.26. Poziționarea senzorilor de temperatură în interiorul piesei

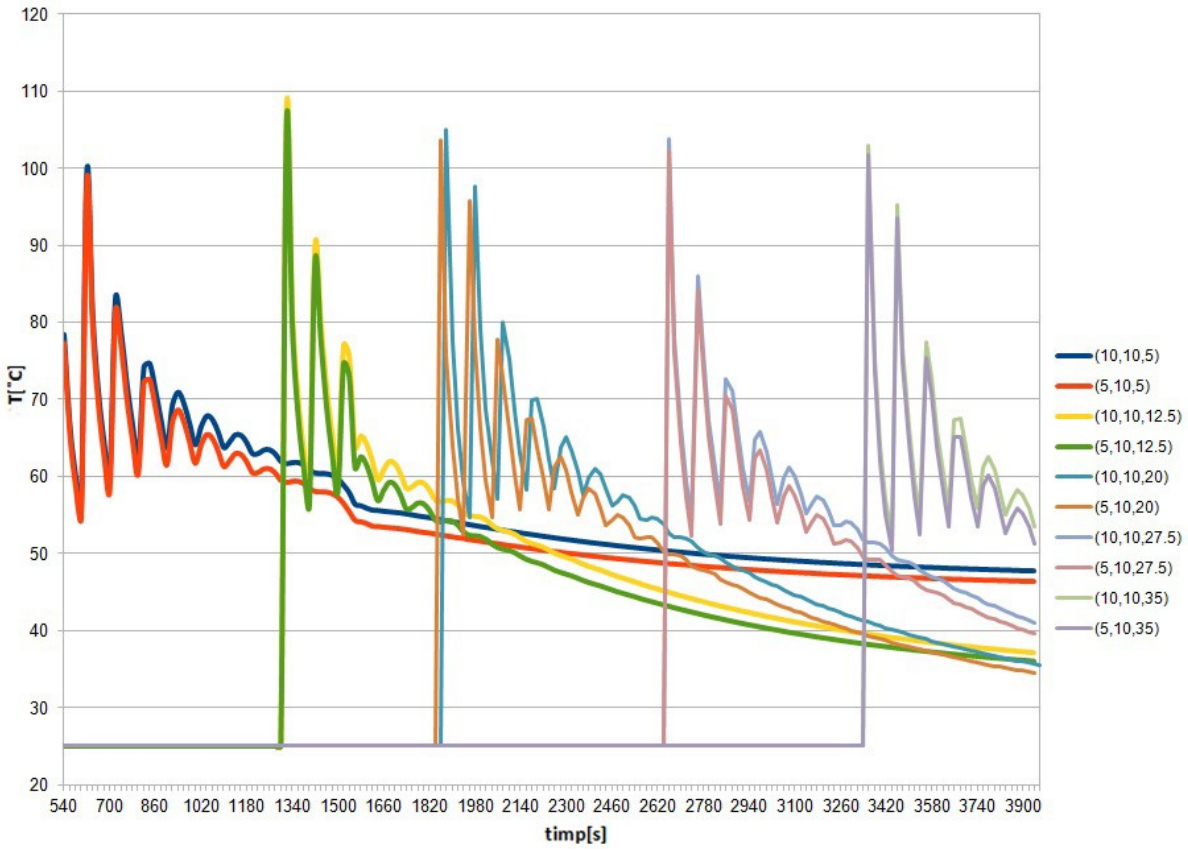


Fig. 6.28. Variația temperaturilor în timpul procesului de fabricație aditivă (5 senzori)

În Fig. 6.28 este trasat graficul rezultatelor experimentale pentru două piese test realizate cu materialul PLA la o temperatură de printare de 210 °C și o viteză de depunere de 60 mm/s. Intervalul de timp în care sunt preluate datele experimentale se încadrează între 540 si 4000 de secunde pentru primul senzor de temperatură, între 1280 și 4000 de secunde pentru al doilea senzor de temperatură, între 1820 s și 4000 s pentru al treilea senzor de temperatură, între 2640

s și 4000 s pentru al patrulea senzor de temperatură, respectiv între 3300 s și 4000 s pentru al cincilea senzor de temperatură.

Valorile reprezentate grafic sunt valorile măsurate pentru ambele puncte din același plan orizontal.

Pe măsură ce punctul măsurat se îndepărtează de patul încălzit, este de remarcat faptul că variațiile de temperatură sunt mai pronunțate inițial, dar se diminuează mai rapid. Aceasta diferență în comportamentul termic al piesei este utilă în determinarea zonelor în care pot apărea tensiuni interne.

Graficul din Fig. 6.29 prezintă diferențele de temperatură între perechile de puncte din planul orizontal. În cazul prezentat, al piesei fabricate din PLA la o temperatură de 210 °C, aceste diferențe sunt cel mult 2,75 °C, indicând faptul că potențialele tensiuni datorate variațiilor termice sunt semnificativ reduse în planul orizontal al piesei [75]. Acest lucru, coroborat cu caracterul ortotropic al pieselor realizate prin fabricație aditivă arată de ce atenția proiectanților de piese realizate prin fabricație aditivă trebuie să fie concentrată asupra tensiunilor apărute în planul vertical al piesei.

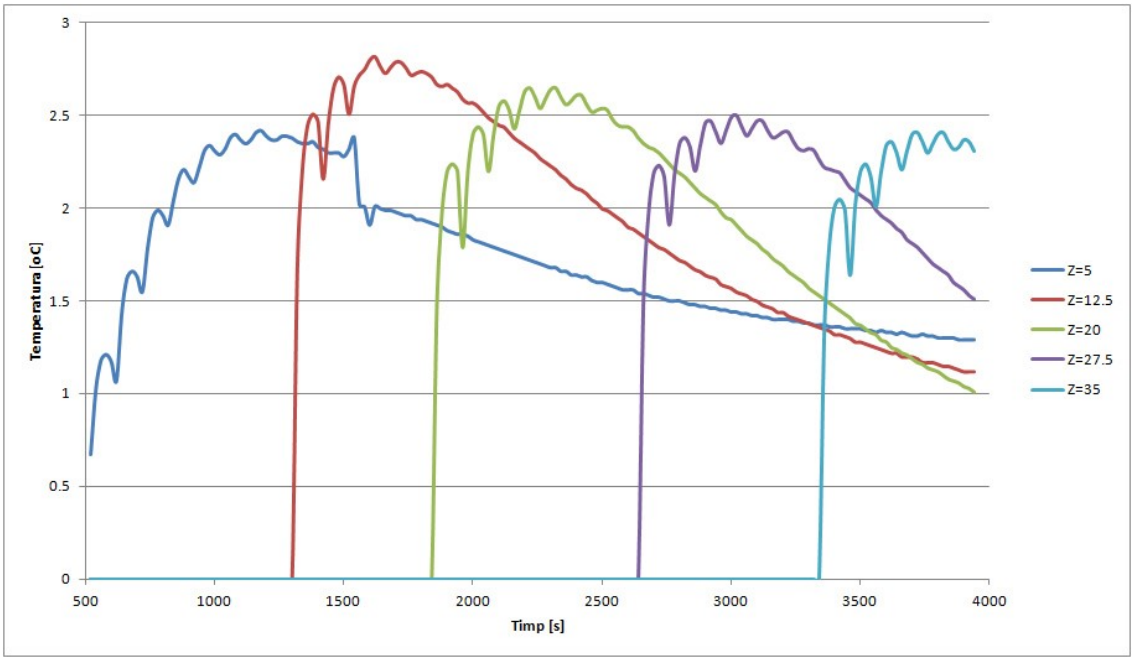


Fig. 6.29. Diferențele de temperatură dintre două puncte din același plan orizontal (PLA, 210 ˚C)

Graficul din Fig. 6.30 arată evoluția termică a pieselor test fabricate din material PLA în cazul creșterii temperaturii de depunere de la 190 °C la 230 °C. Graficele au fost trasate pentru senzorul poziționat la distanța z = 5 mm de patul încălzit.

Întrucât rezultatele experimentale prezentate de alte lucrări în domeniu indică faptul că fuzionarea straturilor de material plastic este mai puternică în cazul depunerii filamentului topit la o temperatură mai înaltă [76], acest element reprezintă o potențială direcție de optimizare pentru creșterea rezistenței mecanice a pieselor fabricate prin depunere de filament topit.

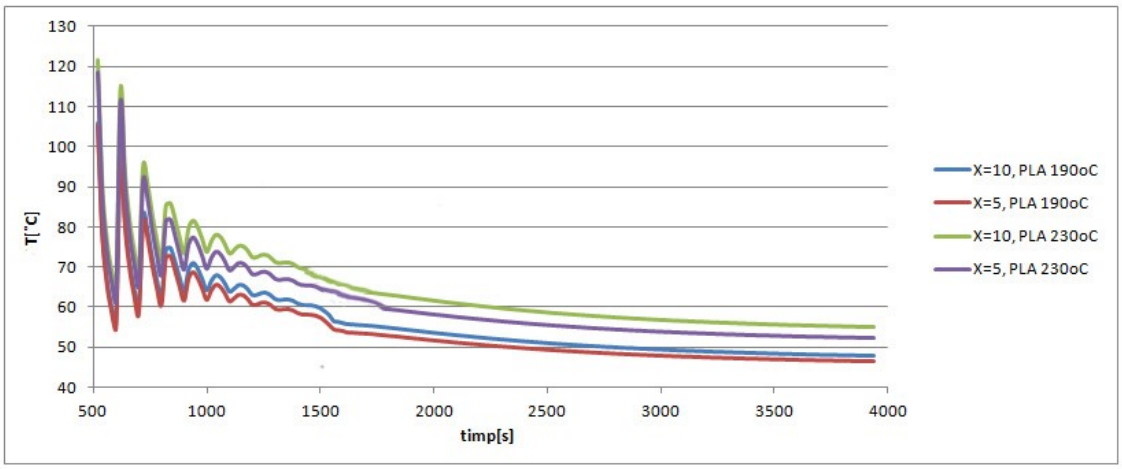


Fig. 6.30. Variația temperaturii pentru piese test fabricate din același material, la temperaturi de depunere diferite (PLA, 190ºC, 230ºC)

În cazul fabricării unei piese folosind o temperatură de depunere a filamentului mai ridicată, se poate observa că diferențele dintre temperatura volumului interior al piesei și cea a suprafeței acesteia este mai ridicată, ceea ce indică necesitatea găsirii unei soluții superioare patului încălzit în cazul pieselor printate la temperaturi înalte (Fig. 6.31)

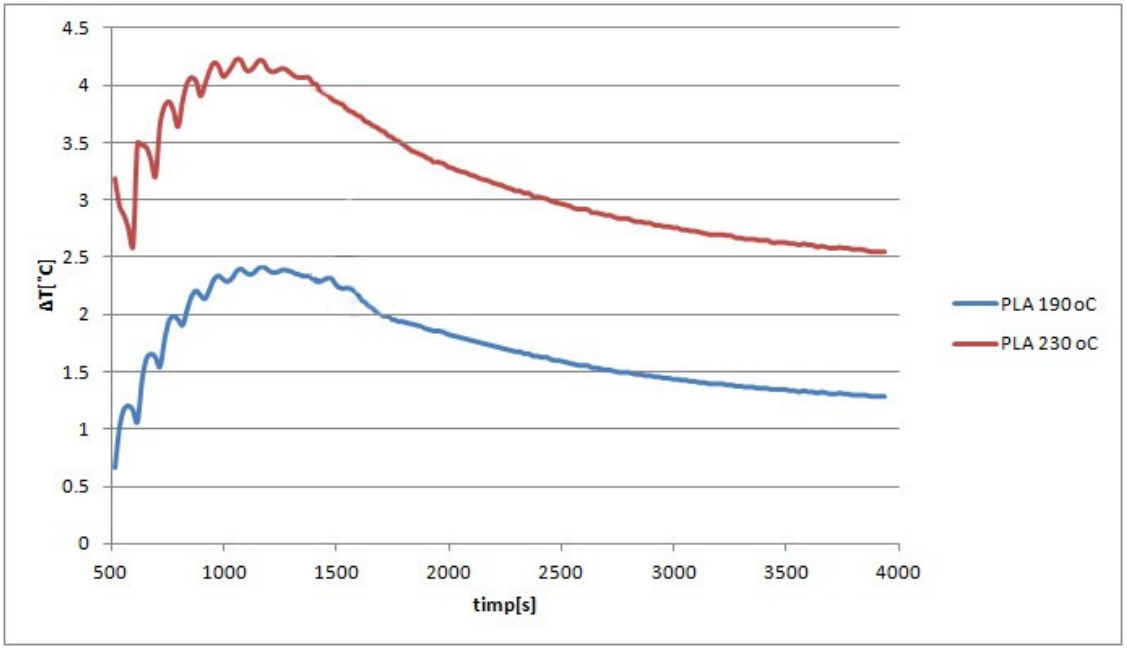


Fig. 6.31. Diferențele de temperatură dintre două puncte în plan orizontal (PLA 190 ˚C, 230 °C)

Pentru a determina influența patului încălzit asupra piesei fabricate, au fost efectuate măsurători experimentale în cazul fabricării pieselor test din material ABS, cu o temperatură de depunere de 230 °C și o temperatură a patului încălzit de 60 °C. Al doilea set de măsurători au fost efectuate în cadrul unui proces de fabricație cu patul încalzit la o temperatură de 110 °C. Deoarece rezultatele analizei cu elemente finite sugerează faptul că influența patului încălzit duce la stabilizarea rapidă a temperaturii în straturile inferioare ale piesei, pentru a evidenția efectul creșterii temperaturii patului de la 60 °C la 110 °C, a fost trasat un grafic care ia în considerare senzorii de temperatură poziționați la distanța z = 12.5 mm de patul încălzit (Fig 6.33).

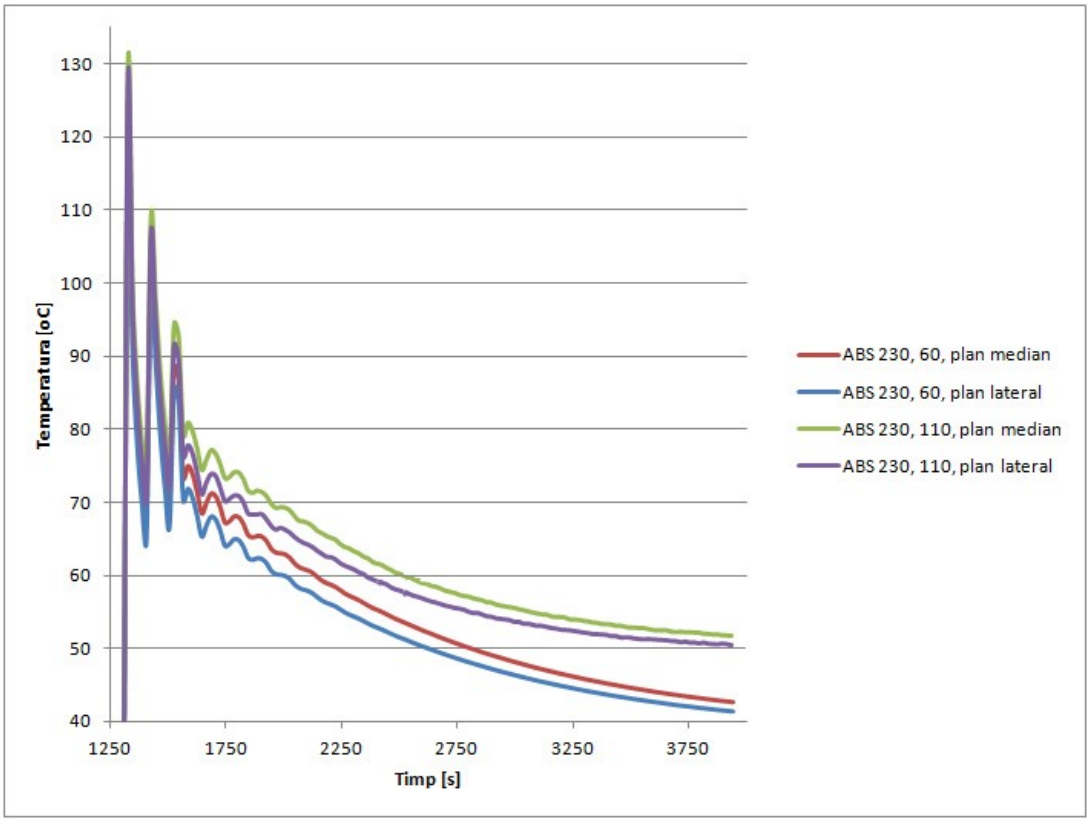


Fig. 6.33. Variația temperaturii pentru piese test fabricate folosind temperaturi diferite ale patului încălzit (ABS, temp. platformei 60 °C, respectiv 110 °C)

Rezultatele obținute în acest caz sunt conform așteptărilor și anume, în cazul patului încălzit la o temperatură mai înaltă, variațiile de temperatură sunt atenuate, iar scăderea temperaturii piesei se produce mai lent.

Pentru a determina influența temperaturii incintei în care este fabricată piesa asupra evoluției temperaturii piesei fabricate, au fost comparate măsurătorile experimentale efectuate în cazul fabricarii pieselor test, inițial cu incinta imprimantei deschisă, apoi închizând incinta și lăsând temperatura aerului din interior să se stabilizeze în jurul valorii de 45 °C. În ambele cazuri, piesele au fost fabricate din material ABS, cu o temperatură de depunere de 230 °C și o temperatură a patului încălzit de 60 °C Temperatura de depunere a materialului este de 230 °C în ambele cazuri. Considerând influența patului încălzit determinată anterior, pentru vizualizarea efectului inchiderii incintei de fabricație a fost desenat un grafic al măsurătorilor experimentale efectuate de senzorii plasați la o distanța z = 20 mm de patul încălzit (Fig. 6.34).

Un alt mod de validare experimentală a metodei de analiză cu elemente finite este vizualizarea unui proces de printare printr-o cameră de termografie. În acest scop a fost realizată o epruvetă de dimensiuni lungime = 30 mm, lățime = 5 mm și înălțime = 30 mm care a fost printată pe o imprimantă 3D Zortrax M200 dintr-un amestec din policarbonat cu ABS. Temperatura de extrudare a fost de 260 °C. Procesul de fabricație a fost înregistrat cu o cameră termică ThermaCAM SC640 (FLIR Systems - Wilsonville, OR, USA). Figura 6.35 arată capturi din această înregistrare, în care se pot observa o distribuție a temperaturilor asemănătoare cu cea determinată prin analiză termică cu element finit descrisă în acest capitol.

Rezultatele măsurătorilor indică un impact mult mai pronunțat al temperaturii incintei comparativ cu cel al temperaturii patului încălzit.

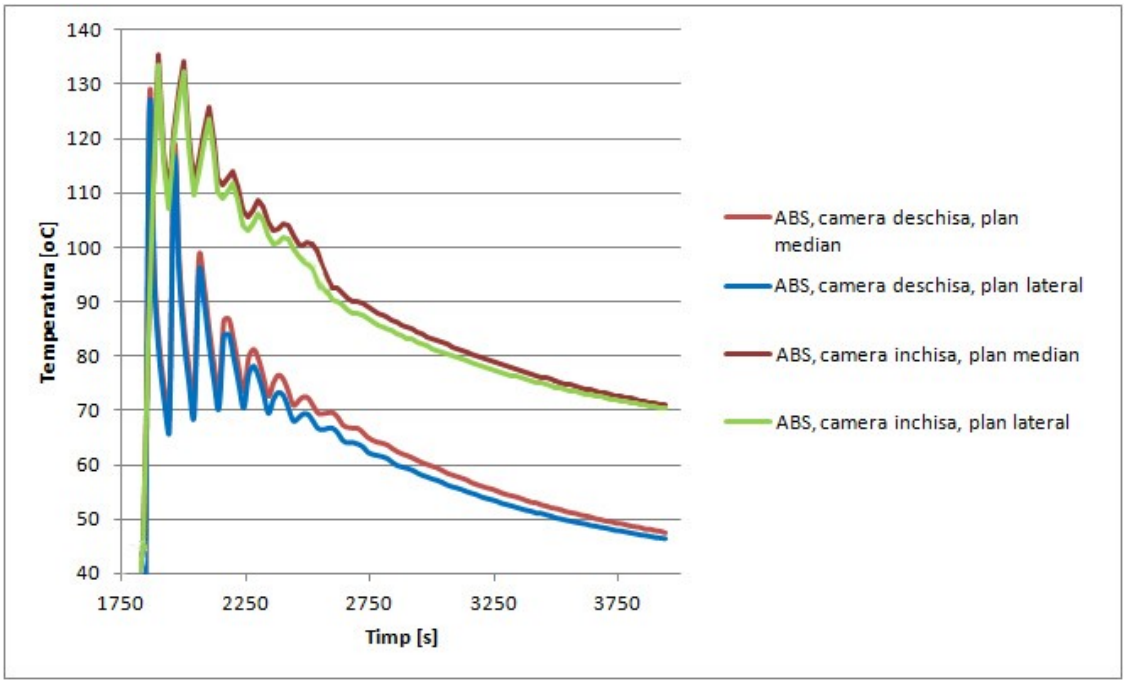


Fig. 6.34. Variația temperaturii pentru piese test fabricate folosind temperaturi diferite ale incintei mașinii (ABS, temp. ambientală 24 °C, respectiv 45°C)

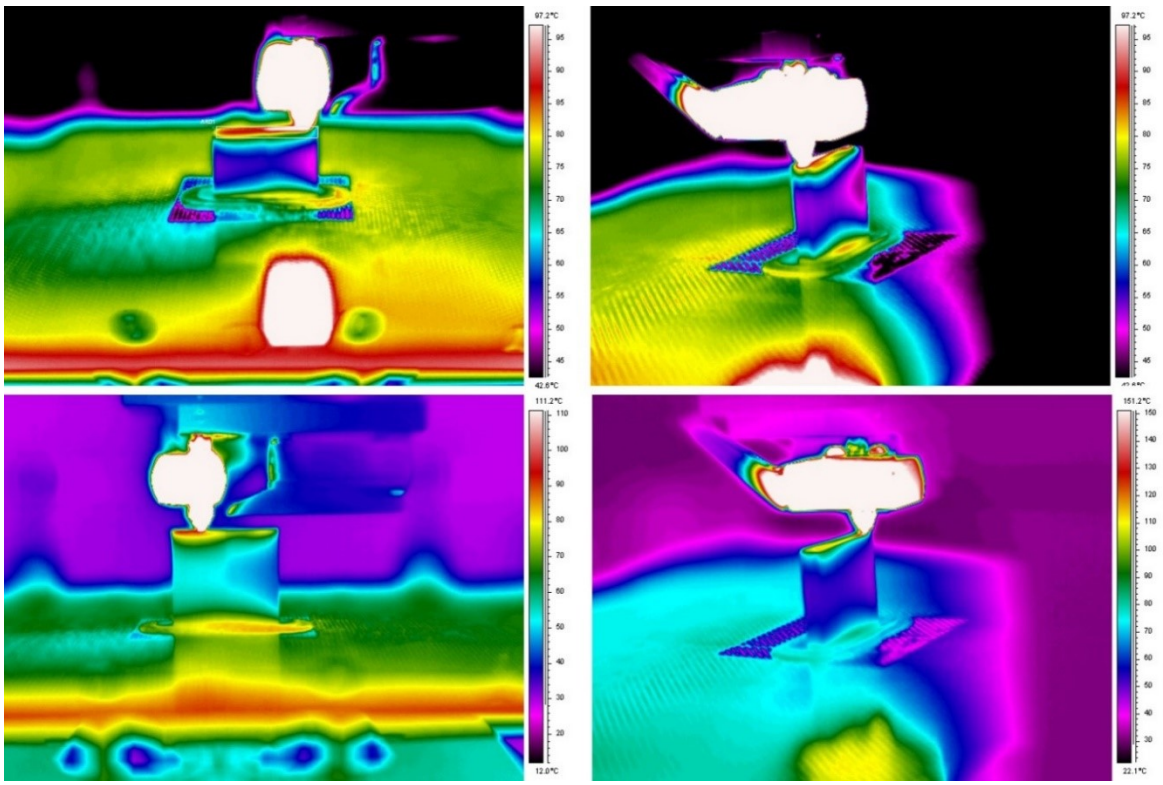


Fig. 6.35. Capturi preluate de la camera termică ThermaCAM SC640 în timpul procesului de fabricație aditivă a unei epruvete din material PC+ABS pe o imprimantă 3D Zortrax M200

CAP. 7 IMPRIMANTĂ FDM CU PRINTARE ÎN INCINTĂ VIDATĂ

Anterior a fost determinat experimental faptul că influența temperaturii incintei imprimantei asupra temperaturii piesei este mult mai semnificativă (Fig. 6.34) decât influența platformei încălzite, care are un efect restrâns (Fig. 6.33). Aceste observații au o importanță majoră, având în vedere că obiectivul studiilor doctorale este de a efectua un proces de fabricație aditivă al obiectelor utilizând materiale plastice speciale, cu temperaturi mari de topire, care necesită un sistem de menținere a temperaturii pieselor la valori adecvate în timpul procesului de fabricație.

O abordare a problemei utilizării materialelor termoplastice cu temperaturi de topire înalte poate fi eliminarea cauzei răcirii inadecvate a materialului depus, și anume fenomenul de convecție termică [77]. Acest lucru ar fi posibil prin depunerea de filament topit într-o incintă vidată. Această abordare prezintă câteva obstacole tehnice care trebuie depășite:

- Obținerea unui nivel de vid în incintă corespunzător aplicației;
- Realizarea unui sistem de transmitere a mișcării care să poată funcționa în vid pe perioade specifice procedeului de fabricație (peste 24 ore de funcționare continuă fără intervenție din exterior);
- Transmiterea energiei electrice pentru componentele electrice și electronice interne;
- Managementul termic al componentelor.

Înainte de a efectua o analiză detaliată a acestor probleme, se pot face câteva observații:

- În industrie sunt folosite la scară largă sisteme de vacuum pentru placări prin sublimare în vacuum; acestea utilizează curent electric de intensitate ridicată
- Elementele de acționare (motoare pas cu pas) de construcție specială pot fi amplasate în vid; o alternativă este plasarea lor în afara incintei vidate și realizarea unui sistem de transmitere a mișcării prin peretele incintei;
- Industria aerospațială reprezintă o importantă sursă de documentație și rezultate experimentale în privința materialelor și sistemelor utilizate în vid.

7.2. TRANSFERUL TERMIC ÎN VID

Căldura se poate propaga prin 3 mecanisme:

- Convecție termică – o formă de transmitere a căldurii specifică fluidelor (gaze și lichide) care depinde de prezența unui material care intră în contact cu volumul de fluid. Convecția este condiționată de existența mișcării particulelor fluidului și poate fi de două tipuri: convecție naturală, dacă particulele fluidului se află în mișcare datorită diferențelor de presiune generate de temperatură, sau convecție forțată, dacă această mișcare este produsă de forțe exterioare (generate de pompe, ventilatore, etc.).
- Conducție termică – reprezintă propagarea temperaturii prin volumul unui material prin coliziuni între particulele elementare ce intră în componența materialului.
- Radiație termică – reprezintă fenomenul prin care corpurile aflate în stare condensată emit radiație electromagnetică.

7.2.1 Transferul termic în cazul extruderului unei mașini pentru fabricație aditivă prin depunere de filament topit.

Prin eliminarea fenomenului de convecție termică, transferul de temperatură în vid se face în mod dominant prin conductivitate termică. În cazul unui proces de fabricație aditivă prin depunere de filament topic, pot fi identificate două momente distincte legate de acest aspect și anume:

- Conductivitatea termică și transferul de căldură din capul încălzit în filament și în structura extruderului în momentul topirii filamentului de material termoplastic;
- Conductivitatea termică și transferul de căldură din volumul de material extrudat în

platforma mașinii.

În cazul extruderului, transferul termic se realizează prin tubul termic și prin materialul conținut de acesta (Fig. 7.6).

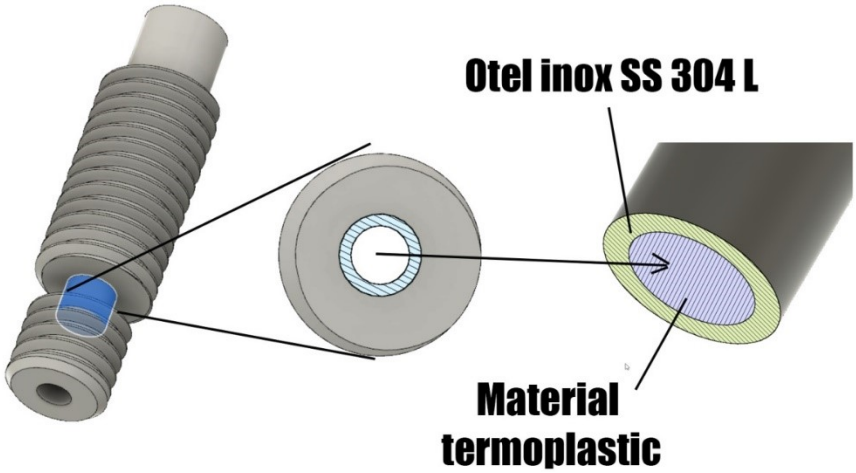


Fig. 7.6. Tubul de reducere a transferului termic și secțiune prin acesta

În secțiunea cu pereții cei mai subțiri, tubul pentru limitarea transferului termic (heatbreak) are un diametru interior de 2 mm și un diametru exterior de 2.8 mm, rezultând o arie a secțiunii de 3.016 mm^2. În timpul funcționării, partea îngustă a acestui tub este plină cu material termoplastic aflat la o temperatură apropiată de temperatura de extrudare. Prin urmare, aria secțiunii materialului termoplastic este de 3.14 mm^2.

Transferul termic prin conductivitate se poate exprima prin legea lui Fourier (Fig. 7.7):

$$q_x = kA\frac{dT}{dx}, \tag{7.17}$$

unde

q_x – cantitatea de căldură transferată [W, J/s];

k – coeficientul de conductivitate termică al materialului [W/mK];

A – aria secțiunii de material [m^2];

dT – diferența de temperatură [K];

dx – grosimea materialului [m].

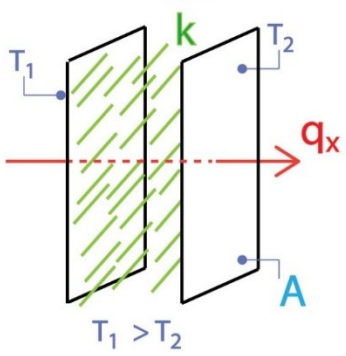


Fig. 7.7. Transferul termic prin conducție termică

7.2.2 Transferul termic în cazul materialului depus

Cantitatea de căldură transferată de către materialul depus depinde de volumul de material extrudat, de viteza de extrudare și de căldura specifică a materialului. Căldura specifică (constantă de material) se determină din relația:

$$Q = cm\Delta T, \tag{7.18}$$

unde

Q este cantitatea de căldură,

c – constantă de material = căldura specifică,

m – masa de material,

ΔT – diferența de temperatură.

Cantitatea de căldură Q care trebuie cedată de materialul termoplastic după depunere (Tabelul 7.7) pentru ca piesa să ajungă la temperatura corespunzătoare este calculată folosind relația:

$$Q = c \cdot \rho \cdot 10^{-3} \cdot R_{dep} \cdot \Delta T, \quad (7.19)$$

unde

c – căldura specifică [J/g·K]; ρ – densitatea g/cm^3; R_{dep} – rata depunerii de material [mm^3/s]; ΔT – diferența de temperatură.

Tabelul 7.7. Căldura cedată de materialul termoplastic după depunere

Material	Căldură specifică [J/gK]	Temperatură de extrudare [°C]	Temperatură Piesă [°C]	Densitate [g/mm^3]	ΔT [°C]	Q min [W]	Q max [W]
PC	1.41	280	80	0.00122	200	0.069	2.064
PEI	1.10	315	95	0.00127	220	0.061	1.844
PPS	0.95	350	105	0.00134	235	0.060	1.795
PEEK	0.32	400	120	0.00132	280	0.024	0.710

7.3 PROIECTAREA IMPRIMANTEI CU INCINTĂ VIDATĂ

7.3.1 Dimensionarea structurii de rezistență a camerei vidate

Se recomandă ca pereții unei camere vidate să fie făcuți din aliaje de metale sau nemetale. Datorită caracteristicilor sale de rezistență, prelucrabilitate și sudabilitate bune, a fost aleasă fabricarea pereților din aliaj de aluminiu EN-AW-5083 cu compoziția chimică AlMg4,5Mn0,7.

Pentru dimensionarea grosimii pereților camerei, a fost efectuată o analiză cu elemente finite folosind modulul de simulare integrat în software-ul Autodesk Fusion 360. Modelul considerat este o placă pătrată de dimensiuni 340 × 340 mm, de grosime standardizată, de 5, 6, 8, respectiv 10 mm. Materialul aplicat modelului a fost preluat din baza de date a aplicației și este "Aluminium 5083 87 cold formed" cu o rezistență la rupere de 270 MPa. Pe suprafața frontală a plăcii a fost aplicată forța gravitațională și o presiune de 1.2 bar, echivalentă diferenței de presiune dintre presiunea din camera de vid și presiunea atmosferică, cu un coeficient de siguranță de 1.2. Volumul modelului virtual a fost discretizat cu o structură tetraedică cu o mărime maximă a elementelor de 1% din dimensiunile modelului.

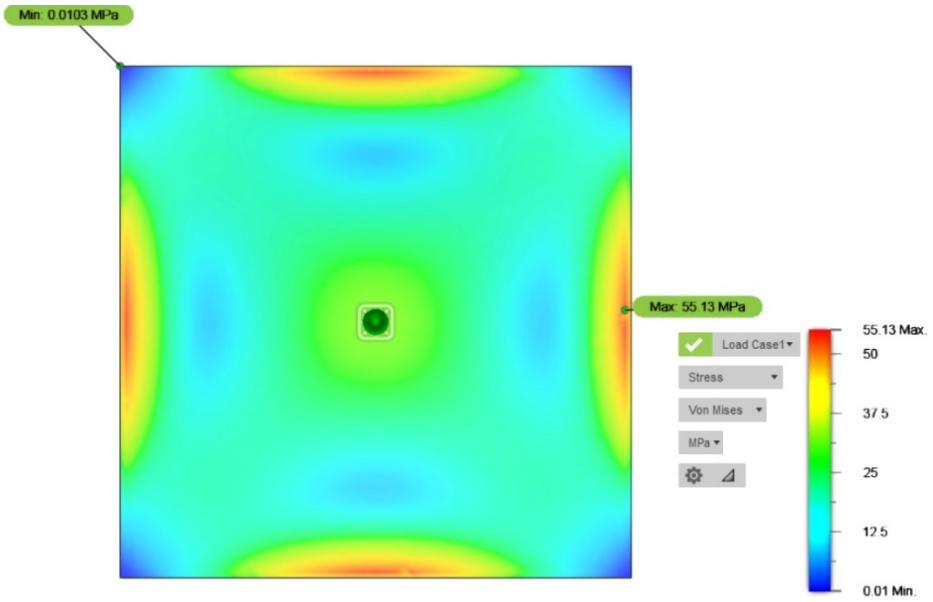


Fig. 7.9. Rezultatul analizei cu elemente finite – Tensiuni apărute în placa de 8 mm grosime

După cum se poate observa în Fig. 7.9, tensiunea maximă apărută în material pentru o grosime a plăcii de 8 mm este 55.13 MPa, sub o treime din tensiunea admisibilă de 150 MPa la care materialul începe să se deformeze plastic. Conform rezultatelor, grosimea materialului de peste 5 mm este suficientă pentru a rezista forțelor la care este supusă în timpul utilizării. Deformarea elastică maximă a materialului este cuprinsă între 0.3307 și 2.6210 mm. Tabelul 7.8 prezintă rezultatele analizei cu elemente finite pentru grosimi de plăci standardizate.

Tabelul 7.8. Rezultatele analizei cu elemente finite – predimensionarea plăcilor din Al 5083

Grosime placă [mm]	Tensiune maximă [MPa]	Deformare maximă [mm]
10	34,15	0.3307
8	**55.13**	**0.6431**
6	97.89	1.5190
5	142	2.6210

7.3.2 Realizarea mişcării relative a extruderului în raport cu platforma maşinii

La stabilirea modului de realizare a mișcării relative a extruderului față de suprafața platformei au fost luate în considerare variantele constructive de imprimante 3D prezentate în cadrul capitolului 3.

Primul criteriu considerat este volumul ocupat de structura mecanică a sistemului de realizare a mișcării. Spațiul de lucru al mașinii trebuie să fie suficient de mare pentru a permite fabricarea probelor standard *ASTM* D638 utilizate la testarea distructivă. S-a stabilit astfel un spațiu de lucru de 180 x 180 x 180 mm. Volumul ocupat de structura mecanică trebuie să fie minim, pentru a reduce foțele ce acționează asupra pereților incintei, datorate diferenței de presiune. Pentru a îndeplini acest criteriu, platforma a fost fixată în planul orizontal iar mișcarea relativă a extruderului în acest plan este realizată cu un sistem tip portal dublu. Mișcarea relativă în plan vertical este realizată prin translația platformei pe axa verticală.

Un al doilea criteriu este poziționarea motoarelor pas cu pas în afara incintei vidate și transmiterea mișcării de rotație prin peretele incintei. Acest lucru este făcut posibil prin sistemul de acționare și de transmitere al mișcării reprezentat în Fig. 7.12.

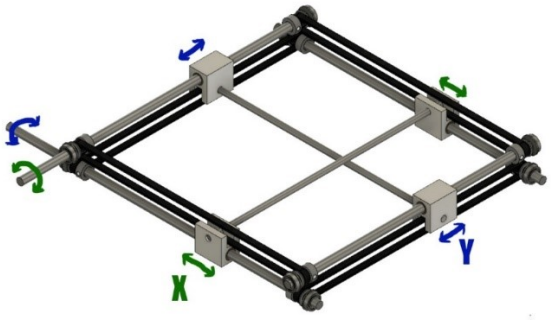


Fig. 7.12. Sistemul de transmitere al mișcării - axele de mișcare orizontale XY

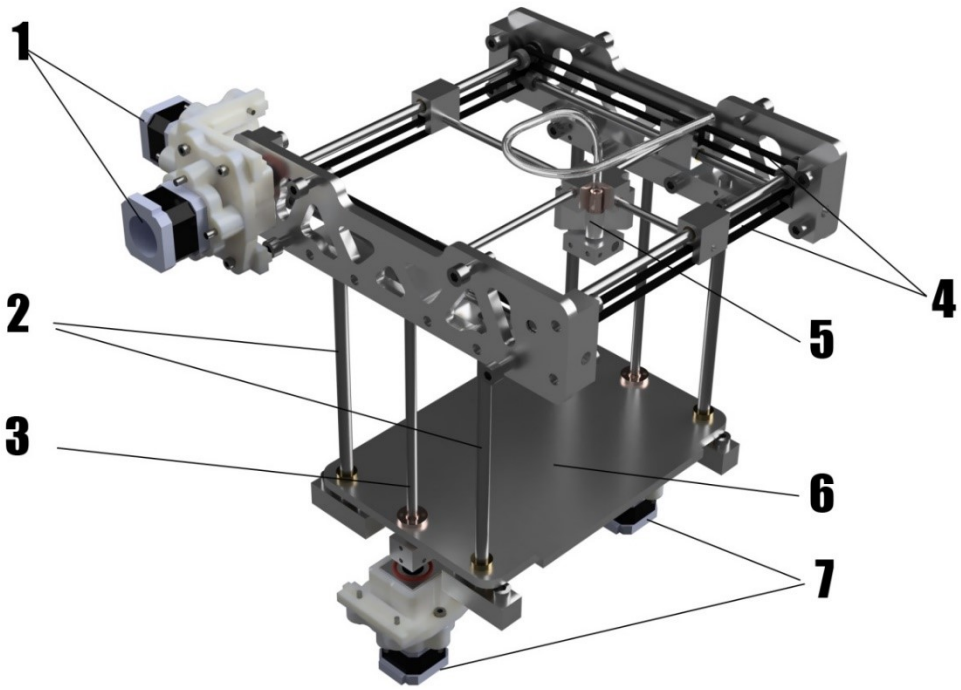


Fig. 7.13. Structura axelor de mișcare

Motoarele pas cu pas (Fig. 7.13 − 1) aflate în exteriorul incintei, transmit mișcarea de rotație prin peretele incintei. Mișcarea de rotație este transformată în mișcare de translație prin intermediul curelelor de tranmisie (Fig. 7.13 − 4). Cele două motoare pas cu pas sunt poziționate pe axe perpendiculare, realizând mișcarea extruderului (Fig. 7.13 − 5) în planul orizontal XY. Platforma de printare (Fig. 7.13 − 6) se mișcă pe axa verticală Z, fiind acționată de către motoare pas în tandem (Fig. 7.13 − 7) care rotesc șurubul trapezoidal (Fig. 7.13 − 3). Ghidarea axei verticale se face folosind axe de ghidare (Fig. 7.13 − 2).

7.3.3 Acţionarea axelor liniare

Ansamblul de acționare al axelor liniare este unul dintre elementele complexe ale sistemului, întrucât trebuie să realizeze acționarea axelor liniare din exteriorul incintei vidate. Transmiterea mișcării de rotație prin axul din oțel inox (Fig. 7.14-1) se face prin pereții camerei vidate, sistemul de acționare incluzând elemente de etanșare. Etanșarea axului aflat în mișcare de rotație se face cu un simering din material fluoropolimer (Fig. 7.14-4) cu coeficient scăzut de frecare și rezistență la uzură. Simeringul este pretensionat în carcasă (Fig. 7.14-5) folosind un inel exterior din oțel inox. Simeringul este optimizat pentru aplicații în vid, având și pretensionare pe axul interior prin intermediul unui arc eliptic. Pentru a îndeplini cerințele de concentricitate necesare etanșării, axul din oțel inox este lăgăruit pe rulmenți radiali cu bile aflați atât în partea vidată (Fig. 7.14-2), cât și în partea supusă presiunii atmosferice (Fig. 7.14-6). Cu scopul de a reduce uzura și de a îmbunătăți etanșarea, între simering și rulment este introdusă vaselină cu degazare redusă. Carcasa care găzduiește componentele de etanșare este introdusă în carcasa ansamblului (Fig. 7.14-7) și prinsă de peretele imprimantei cu piese de fixare (7.14-8). Un o-ring frontal din polimer tip Viton (Fig. 7.14-3) etanșează sistemul. Mișcarea de rotație este transmisă de la motorul pas cu pas (Fig. 7.14-11) la ax prin intermediul unui cuplaj flexibil (Fig. 7.14-10) care are rolul de a reduce vibrațiile și de a compensa excentricitatea celor două axuri cuplate.

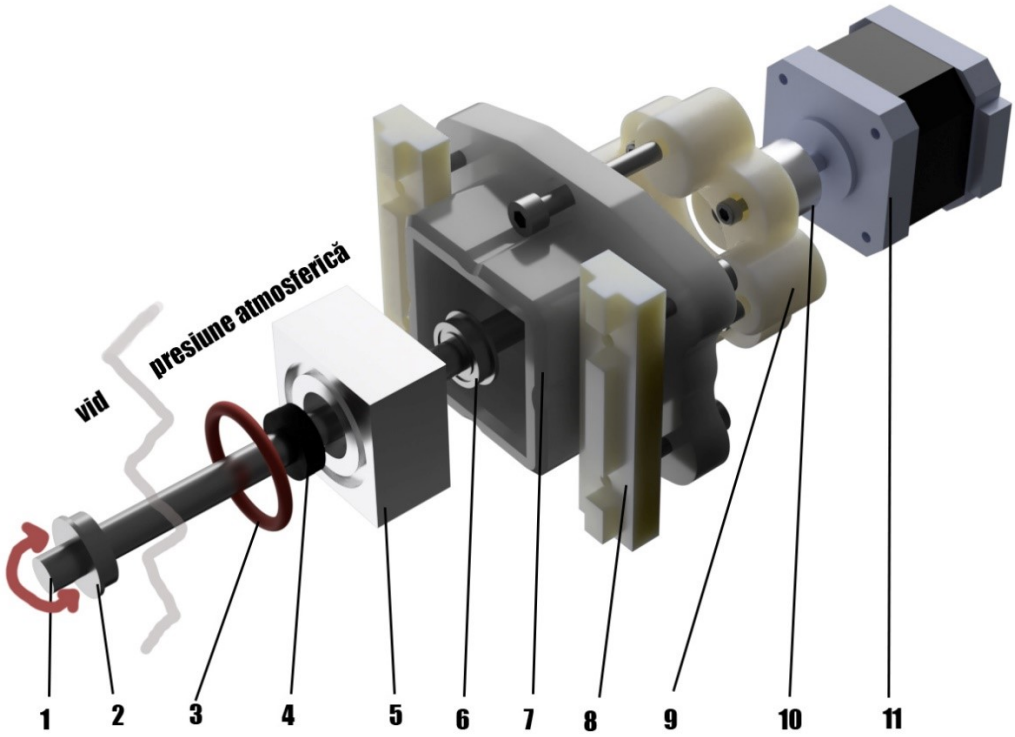


Fig. 7.14. Ansamblu acționare axe liniare

7.3.4 Extruderul de filament termoplastic

În cadrul capitolului 6 au fost efectuate analize termice cu elemente finite pentru două tipuri de extruder utilizate în imprimante 3D disponibile în comerț. Recomandările efectuate în urma analizării rezultatelor acestor simulări au fost aplicate în proiectarea unui extruder (Fig. 7.15) capabil să proceseze filament termoplastic la temperaturi înalte și presiune sub-atmosferică.

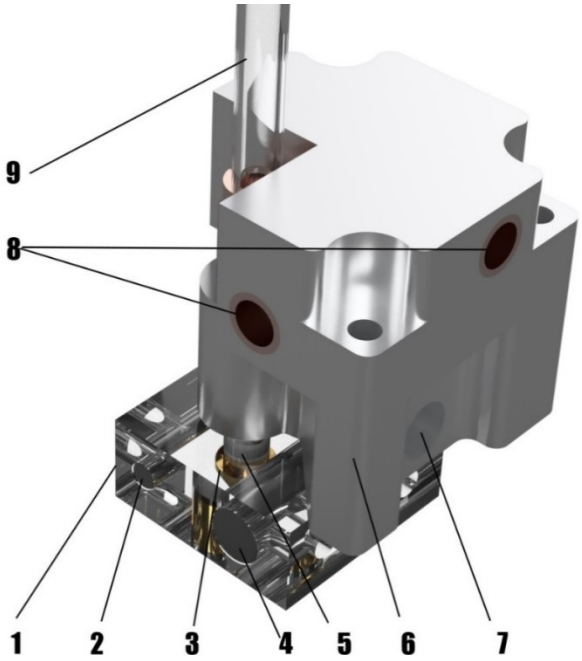


Fig. 7.15. Ansamblul extruderului

Conform recomandărilor, duza de extrudare din alamă întâlnită la extrudoarele disponibile în comerț a fost înlocuită cu o duză de extrudare din oțel inox (Fig. 7.15-3) care își menține proprietățile mecanice la temperaturi de 400 °C. De asemenea, tubul pentru încetinirea transferului termic din teflon a fost eliminat, ghidarea filamentului făcându-se prin tubul din oțel inox (Fig. 7.15-5). Încălzirea duzei de extrudare și topirea materialului termoplastic este efectuată cu o rezistență ceramică cu o putere de 80 W (Fig. 7.15-4). Temperatura este monitorizată cu un senzor de temperatură tip PT100 utilizabil până la temperaturi de 500 ºC (Fig. 7.15-2). Senzorul, cartușul ceramic și duza de extrudare sunt fixate într-un bloc de încălzire din aluminiu (Fig. 7.15-1).

Întrucât aerul din incintă este evacuat, răcirea corpului extrudorului (Fig. 7.15-6) se face utilizând răcire cu lichid (Fig. 7.15-7). Menținerea la temperaturi sub 60 ºC a corpului extrudorului se face pentru a împiedica transferul termic prin conducție către alte piese ale mașinii și de a menține bucșele pentru translația extruderului în plan orizontal (Fig. 7.15-8) la temperaturi corespunzătoare.

7.3.5 Transferul curentului electric prin pereții camerei cu vid

Modelul constructiv al imprimantelor 3D cu depunere de filament topit necesită poziționarea unor componente electrice în interiorul incintei (senzori de capăt, rezistență pentru topirea filamentului termoplastic, senzori de temperatură, etc.). Prin urmare, în cazul imprimantei cu incintă vidată, este necesară trecerea conductorilor electrici care alimentează aceste componente prin peretele camerei de vid, fără a compromite nivelul de vid din interior.

Alegerea materialelor de etanșare și dimensionarea elementelor de trecere (Fig. 7.16) se va face ținând cont de intensitatea și tipul de curent necesar:

- 220 V curent alternativ, 0.5 A pentru alimentarea cartușului ceramic;
- 5 V curent continuu, 300 mA pentru alimentarea senzorului de temperatură;
- 3.3 V curent continuu pentru alimentarea senzorilor de capăt;

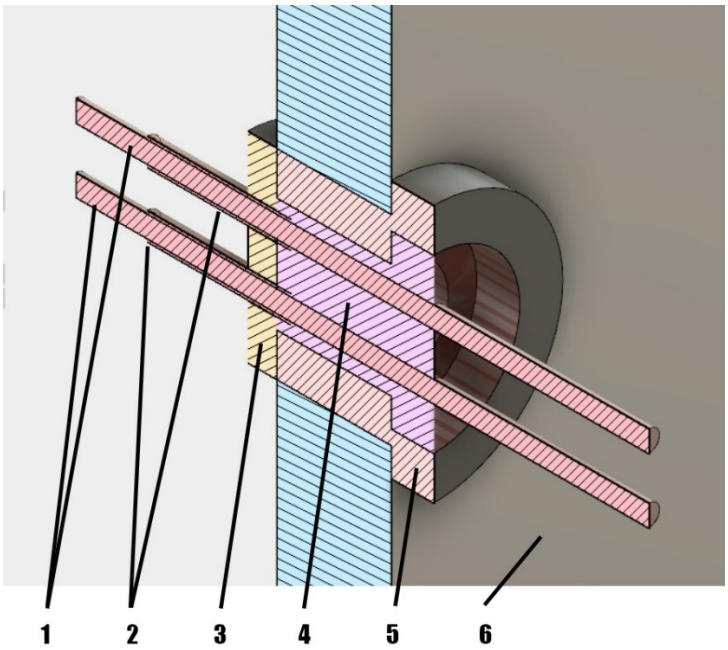


Fig. 7.16. Ansamblu de trecere pentru conductori electrici

Conductorii electrici (Fig. 7.16-1) sunt etanșați folosind un volum de rășină epoxidică (Fig. 7.16-4) cu proprietăți de degazare corespunzătoare utilizării în vacuum. Pentru a limita masa de rășină pierdută prin evaporare, suprafața acesteia care este expusă la mediul vidat este acoperită cu un capac din oțel inox (Fig. 7.16-3). Conductorii sunt izolați electric în zona capacului folosind bandă din kapton (Fig. 7.16-2). Volumul de rășină epoxidică se obține prin

turnare într-un conector din aluminiu (Fig. 7.16-5). Conectorul este fixat în peretele camerei de vid (Fig. 7.16-6) prin înșurubare. Diametrul conectorului și volumul de rășină necesar etanșării vor fi dimensionate în funcție de numărul de fire electrice.

7.4 PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE

În cadrul programului de doctorat au fost efectuate cercetări privind fabricația aditivă a pieselor din materiale plastice speciale (cu temperaturi ridicate de topire) care necesită un sistem de menținere a temperaturii pieselor la valori adecvate în timpul procesului de fabricație pentru a preveni apariția defectelor cauzate de tensiunile termice interne.

Cercetările din domeniu asupra pieselor realizate din ABS și poliamide într-un mediu inert de azot [85], arată că proprietățile mecanice ale pieselor printate sunt mai bune în absența oxigenului.

Aplicația aleasă pentru investigare în detaliu este fabricarea pieselor în absența oxigenului, într-o incintă vidată. Prin excluderea aerului se urmărește uniformizarea procesului de transfer termic din piesa printată 3D în timpul fabricației, pentru a se diminua influența ciclurilor repetate de răcire/încălzire asupra proprietăților mecanice ale piesei.

Într-un sistem, căldura se poate propaga prin 3 mecanisme:

- Convecție termică – o formă de transmitere a căldurii specifică fluidelor (gaze și lichide) care depinde de prezența unui material care intră în contact cu volumul de fluid. Convecția este condiționată de existența mișcării particulelor fluidului și poate fi de două tipuri: convecție naturală, dacă particulele fluidului se află în mișcare datorită diferențelor de presiune generate de temperatură, sau convecție forțată, dacă această mișcare este produsă de forțe exterioare (generate de pompe, ventilatore, etc.).
- Conducție termică – reprezintă propagarea temperaturii prin volumul unui material prin coliziuni între particulele elementare ce intră în componența materialului.
- Radiație termică – reprezintă fenomenul prin care corpurile aflate în stare condensată emit radiație electromagnetică.

Întrucât în camerele de vid aerul atmosferic care reprezintă mediul de propagare al căldurii prin convecție este evacuat, fenomenul de transfer termic prin convecție este eliminat treptat. Ceea ce determină dacă transferul termic prin convecție are loc, precum și cantitatea de căldură transferată, este drumul liber mediu al moleculelor de aer din camera vidată. Drumul liber mediu este distanța medie parcursă de o moleculă din interiorul unui volum până când aceasta se ciocnește de o altă moleculă. În teoria cinetică a gazelor proprietăţile acestora sunt explicate pe baza mişcărilor moleculelor. În cadrul acestei teorii, moleculele de gaz se mişcă liber, continuu, dependent de temperatură, influenţându-se reciproc numai în momentul ciocnirii.

În sprijinul cercetărilor a fost realizat un prototip de imprimantă 3D cu incintă vidată cu ajutorul căreia au fost fabricate o serie de repere printate atât în vid cât și în atmosferă la temperatura camerei. Reperele au fost supuse încercărilor mecanice pentru determinarea rezistenței la tracțiune.

7.5 STRUCTURĂ MECANICĂ

Camera de vid este realizată din tablă de aluminiu 5083 cu o grosime de 8 mm prelucrată prin tăiere cu jet de apă, cu geometrie care se întrepătrunde pentru asamblare mai ușoară. Golurile dintre pereți au fost etanșate folosind rășină epoxidică. Camera de vid este montată pe o structură exterioară din profile industriale din aluminiu. Pe aceeași structură exterioară sunt montate și motoarele pas cu pas care acționează sistemul de mișcare al imprimantei.

Platforma (patul) de printare este fabricată din placă din aliaj de aluminiu EN-AW-5083 cu grosime de 8 mm și are atașată la suprafață o placă perforată din material FR4. Rolul plăcii

perforate este de a reține o structură ajutătoare de tip “raft” pe care este fabricată piesa, prevenind delaminarea acesteia în timpul printării. Platforma se deplasează pe axa verticală Z (Fig. 7.17), sistemul de mișcare fiind format din două motoare pas cu pas, cuplate rigid la un șurub de mișcare trapezoidal cu 2 începuturi și pas de 8 mm. Platforma este ghidată la fiecare capăt pe câte două ghidaje liniare. Bucșele de ghidare și piulița de mișcare sunt realizate din bronz sinterizat.

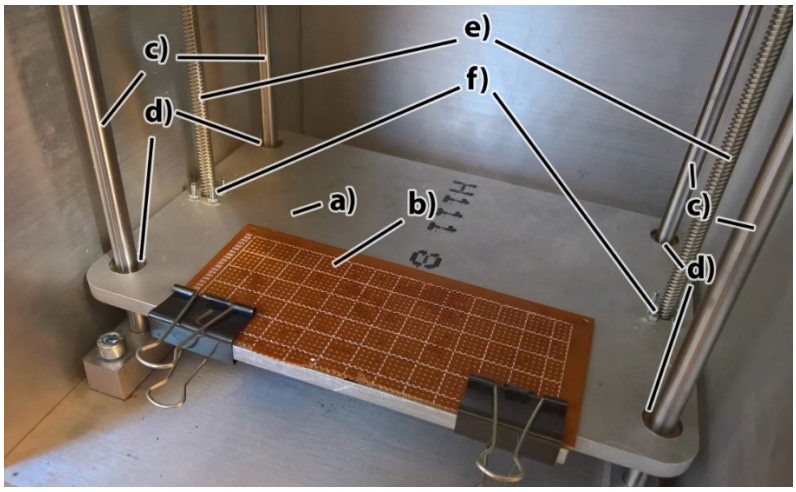


Fig. 7.17. Platforma de printare și axa verticală Z. a) platforma; b) placă perforată; c) axe liniare de ghidare; d) bucșe de ghidare; e) șuruburi trapezoidale de mișcare; f) piulițe de mișcare.

Axele orizontale X și Y (Fig. 7.18) sunt acționate prin intermediul unui mecanism cu curea de transmisie din cauciuc de 6 mm lățime, ranforsată cu fire din kevlar. Bucșele din bronz permit extrudorului să alunece liber pe axele de ghidare din oțel inoxidabil.



Fig. 7.18. Axele orizontale ale imprimantei

În cazul acționării mecanice, mișcarea trebuie să fie transmisă prin peretele camerei vidate fără a pierde vidul realizat. În acest scop este folosit un sistem de etanșare (Fig. 7.19) cu simering din viton cu arc eliptic de pretensionare pentru aplicații de etanșare la vid. Simeringul este introdus într-o carcasă din aluminiu care se cuplează la peretele camerei vidate printr-o etanșare plană cu garnitură tip o-ring. Axul de rotație care angrenează cureaua de transmisie este conectat la axul motorului pas cu pas printr-un cuplaj elastic din aluminiu.

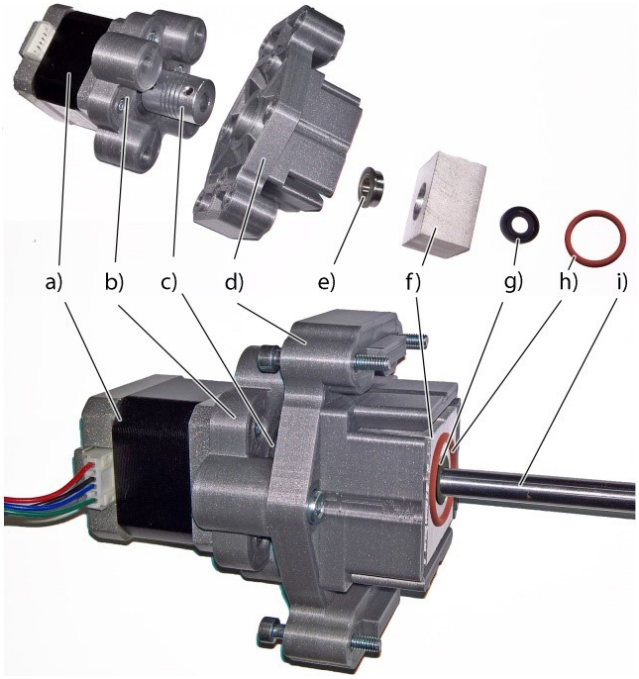


Fig. 7.19. Sistem pentru etanșarea axurilor pentru transmiterea mișcării. a) motor pas cu pas; b) suport motor intermediar (printat 3D PLA); c) cuplaj elastic; d) suport motor (printat 3D PLA); e) rulment cu flanșă f) carcasă pentru rulment și simering; g) simering; h) o-ring; i) ax rotație.

7.6 COMPONENTE ELECTRICE ȘI ELECTRONICE

Încălzirea și componentele care au ca rol controlul temperaturii de printare, precum și pompa de vid sunt alimentate de la priză, cu 230 V curent alternativ. Restul componentelor imprimantei sunt alimentate printr-o sursă de alimentare de curent continuu 12 V, 20 A (240 W).

Rezistență ceramică – este folosită o rezistență cu o putere de 80 W ce funcționează la 230V curent alternativ. Având o putere dublă față de rezistențele întâlnite în mod uzual la imprimantele existente în comerț (30−40 W), temperatura de printare posibilă este de 400 ^{o}C.

Pompă de apă – pentru răcirea capătului încălzit al extruderului este necesară folosirea unui circuit de răcire cu apă alimentat de către o pompă de curent continuu 12 V.

Pompa de vid este o pompă cu două trepte și o adâncime maximă a vidului de 0.2 Pa (2 × 10^{-3} mbar). Caracteristicile tehnice ale pompei de vid se regăsesc în Tabelul 7.13.

Tabelul 7.13. Caracteristicile tehnice ale pompei de vid

Caracteristică	**Valoare**
Debit aer	51 L /min
Vacuum	2 × 10^{-1} Pa (1.5 × 10^{-3} Torr)
Putere	250 W
Port intrare	1/4” SAE
Capacitate ulei	200 ml
Greutate	9 kg

Funcțiile imprimantei sunt comandate prin intermediul unei plăci de expansiune RAMPS 1.4 atașate unui microcontroller tip Arduino MEGA 2560. Placa de expansiune are incluse 5 drivere pentru motoare pas cu pas tip Allegro A4988 [86].

Reglarea temperaturii de extrudare se face separat de controllerul principal, cu ajutorul unui circuit (Fig. 7.22) format dintr-un controller de temperatură PID tip REX-C100 cu interval de monitorizare al temperaturii între 0 ^{o}C și 999 ^{o}C care primește semnal de la o termocuplă

tip K și comută o rezistența ceramică prin releul tip solid-state. S-a ales această soluție datorită interfeței limitate a plăcii de expansiune RAMPS 1.4 care permite numai interfațarea cu senzori tip NTC, caz în care temperatura maximă monitorizată poate fi până în 250 ºC.

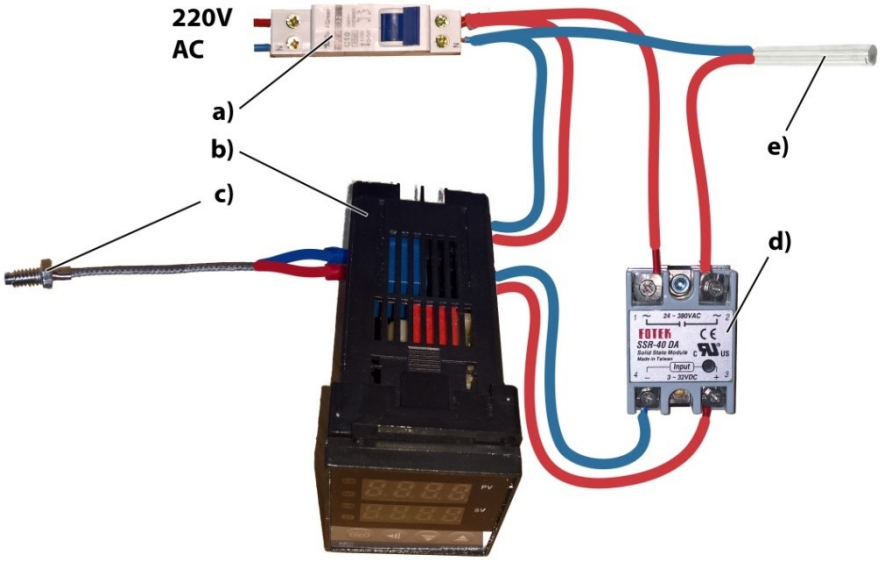


Fig. 7.22. Circuit de control al temperaturii de extrudare. a) întrerupător automat; b) Controller de temperatură REX-C100; c) termocuplă tip K; d) releu solid state; e) rezistență ceramică

Motoare pas cu pas. Axele imprimantei și sistemul de alimentare cu filament sunt acționate de către motoare pas cu pas tip NEMA17 model 42BYGHW609 cu pas de rotație de 1.8º. Acestea sunt comandate de către drivere pentru motoare pas cu pas Allegro A4988 (2A max) într-o configurație cu micropășire 1/256.

7.7 SOFTWARE ȘI FIRMWARE

7.7.1 Firmware

Pe controllerul Arduino MEGA 2560 este încărcat firmware-ul open-source Marlin 1.3 [87] care a fost adaptat caracteristicilor mecanice și de proces specifice aplicației. Deoarece temperatura nu este controlată direct de către microcontroller și este setată separat în controllerul REX-C100, temperatura minimă de extrudare (standard − 170 ºC) a fost dezactivată. În mod similar a fost dezactivată și funcția de protecție termică. Aceasta ar fi închis alimentarea cu energie în cazul în care senzorul de temperatură nu detectează creșterea temperaturii o dată cu alimentarea rezistenței electrice. Firmware-ul Marlin 1.3 vine preconfigurat pentru driverele de motoare pas cu pas Allegro A4988.

7.7.2 Slicer (program de secționare a modelului 3D în straturi orizontale)

Imprimanta a fost configurată în programul de secționare Simplify 3D 4.0 (Ohio, SUA). O serie de instrucțiuni sunt executate la începutul fiecărui program de printare. Extruderul este adus în poziția de zero, platforma de pe axa Z este recalibrată și extruderul este purjat. La sfârșitul programului de printare este executată o altă serie de instrucțiuni care aduc extruderul și platforma înapoi la punctul de zero și semnalează sfârșitul programului.

CAP. 8. TESTĂRI EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE

8.1 METODĂ ȘI MATERIALE

Două materiale au fost selectate pentru testarea dispozitivului și a metodei de fabricație: ASA (acrilat de acrilonitril stiren) și PEI (polieterimidă).

ASA – acrilat de acrilonitril stiren sau stiren acrilonitril acrilic este un material termoplastic produs ca alternativ al ABS-ului (acrilonitril butadien stiren) și este utilizat la scară largă în industria automobilelor. Structural, ASA este foarte asemănător cu ABS-ul dar este mai rezistent la intemperii și la radiațiile ultraviolete, mai rezistent la temperaturi înalte pe termen lung și mai rezistent la alcooli și agenți de curățare. ASA își păstrează luciul, culoarea și proprietățil mecanice la expunerea în aer liber. Are rezistență chimică și termică bună, luciu ridicat, bune proprietăți antistatice și este dur și rigid. Se utilizează în aplicații care necesită rezistență la intemperii, cum ar fi la afișaje comerciale, părți exterioare ale vehiculelor sau mobilier în aer liber.

Din comerț a fost achiziționat filament ASA cu diametrul Ø1.75 mm comercializat sub brandul ApolloX (Formfutura – Nijmegen, Olanda).

PEI – polieterimida este un material termoplastic cu temperatură de topire înaltă, utilizat în mod special în instrumentația alimentară, chimică și în cea medicală datorită stabilității sale chimice, rezistenței la solvenți și la foc și datorită posibilităților de sterilizare. Ultem este o familie de polieterimide create la începutul anilor 1980 de către Joseph G. Wirth. Ultem 1000 (rășina standard, fără aditivi) are rezistență dielectrică ridicată, nu arde și degajă foarte puțin fum. Produsele din Ultem pot fi prelucrate prin așchiere, au proprietăți mecanice foarte bune (rezistență, rigiditate) și pot fi folosite în regim continuu la temperaturi de până la 170 ^{o}C.

Din comerț a fost achiziționat filament PEI cu diametrul Ø1.75 mm comercializat sub brandul Thermax (3DXTech – Grand Rapids, MI, SUA). Rășina din care a fost realizat filamentul este comercializată sub brandul Ultem 1010 (SABIC - Riad, Arabia Saudită).

Dimensiunile pieselor test au fost alese pe baza standardului pentru testarea plasticelor ASTM D638 tip I [88] iar secțiunea minimă este de 3.5 x 13 mm.

La stabilirea temperaturilor de extrudare au fost luate în considerare recomandările producătorilor. Au fost fabricate în total 12 epruvete, câte trei pentru fiecare material și condiții ale mediului de printare (atmosferă/vid). Epruvetele au fost fabricate cu o grosime a stratului de material de 0.2 mm, cu 3 contururi exterioare și infill 100%, alternând între -45º / +45º traiectoria utilizată pentru umplerea volumului interior al piesei. Temperatura de extrudare a fost de 250 ºC pentru materialul ASA și de 375 ºC pentru PEI.

Datorită diferenței mari dintre temperaturile de topire ale celor două materiale, duza de extrudare din oțel inox a fost înlocuită după schimbarea materialului. Toate epruvetele au fost fabricate în poziție orizontală.

8.2 CALITATEA SUPRAFEȚELOR ȘI PRECIZIE DIMENSIONALĂ

Precizia dimensională a specimenelor realizate a fost măsurată după printare cu un șubler electronic și s-a constatat că nu există diferențe semnificative în cazul pieselor printate în incinta vidată comparativ cu cele printate în atmosferă la temperatura camerei. În cazul a două dintre epruvetele ULTEM printate în condiții atmosferice s-a constatat o ușoară delaminare a piesei de pe structura ajutătoare tip raft. Toate epruvetele ASA, precum și cele ULTEM 1010 printate în vid au prezentat aderență bună a straturilor.

În literatura de specialitate este prezentat faptul că îndepărtarea oxigenului, de exemplu folosind gaz inert [89] poate duce la îmbunătățirea calității suprafețelor pieselor printate Calitatea suprafețelor poate fi analizată folosind microscopia de forță atomică.

Pentru a compara calitatea suprafețelor, piesele printate din material Ultem 1010 au fost analizate folosind microscopul de forță atomică NTEGRA Probe NanoLaboratory. Piesele au fost inspectate pe suprafața laterală, pentru a se putea observa și calitatea suprafețelor la îmbinările dintre straturile de material depuse succesiv. Inspecția s-a făcut de-a lungul filamentelor depuse (Fig. 8.6).

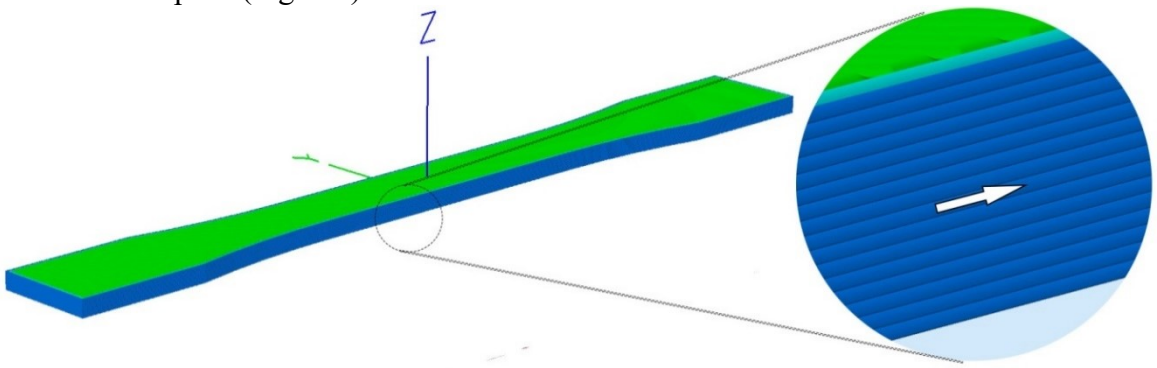


Fig. 8.6. Direcția scanării

Folosind datele prelevate de către microscopul de forță atomică, grafice tridimensionale (Fig. 8.9, Fig. 8.11) au fost trasate pentru suprafețele inspecate ale celor două tipuri de piese. Datele referitoare la calitatea suprafeței pieselor au fost extrase folosind software-ul NOVA și se regăsesc în Tabelul 8.3.

Tabelul 8.3. Calitatea suprafeței pieselor printate 3D

Mediu printare	Rugozitate Ra [µm]
Atmosfera	6.50 ± 0.26
Presiune redusă	6.52 ± 0.21

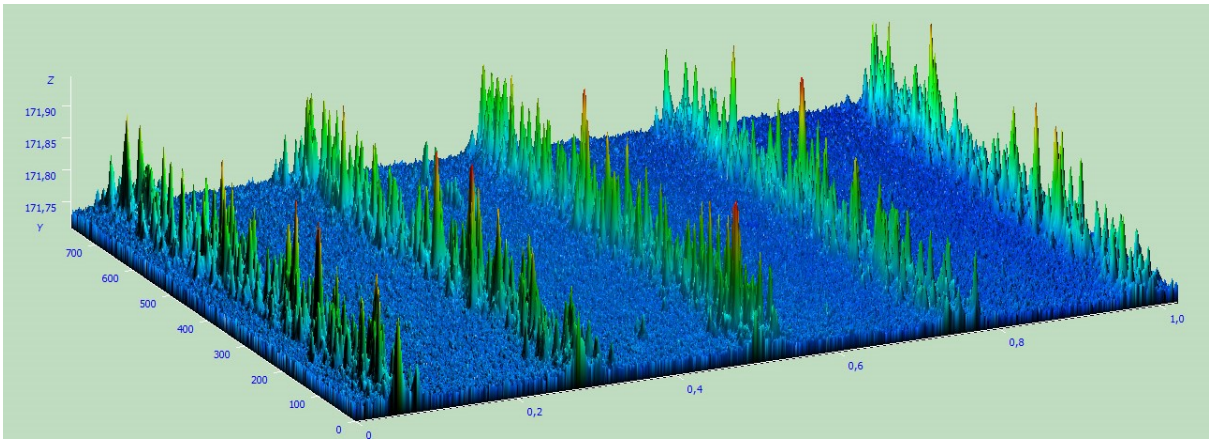


Fig. 8.9. Profilul suprafeței laterale a piesei din material Ultem 1010 printată în condiții atmosferice

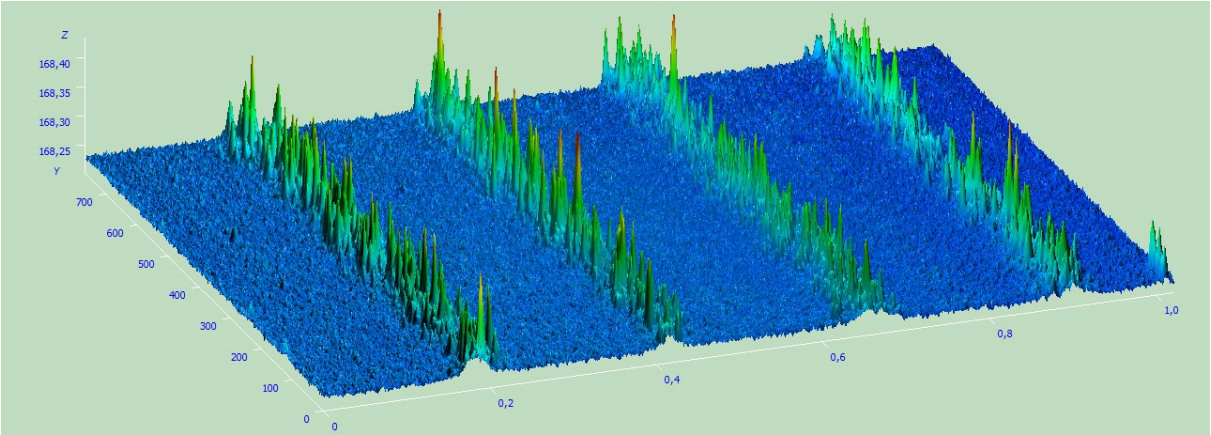


Fig. 8.11. Profilul suprafeței laterale a piesei din Ultem 1010 printată în condiții de presiune redusă

8.3 ÎNCERCAREA LA TRACȚIUNE

Pentru a determina caracteristicile mecanice ale pieselor rezultate în urma printării în vid au fost efectuate încercări la tracțiune pe specimene de dimensiunile precizate anterior. Încercările au fost efectuate pe o mașină de încercări universală Hounsfield H10KT cu capacitate maximă de încărcare de 10 kN. Testele au fost efectuate cu o pretensionare de 5 N și o viteză de încărcare de 5 mm / min, la o temperatură ambientală de 24 ^{o}C și o umiditate de 60%.

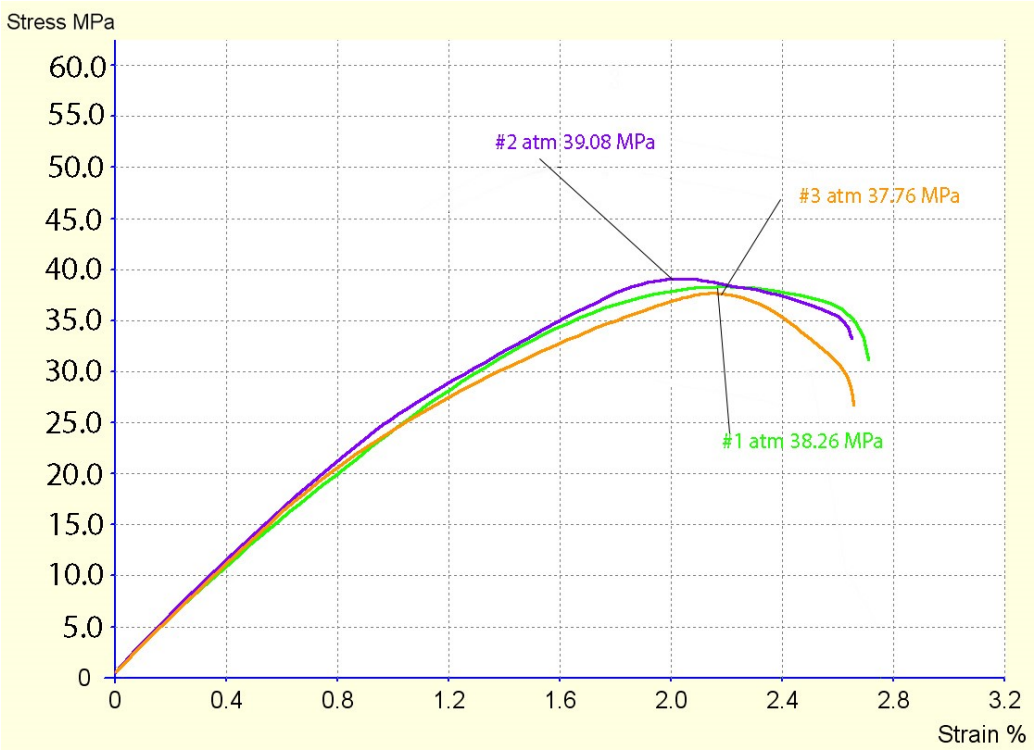


Fig. 8.14. Grafic rezultate încercare la tracțiune – epruvete din ASA printate în atmosferă

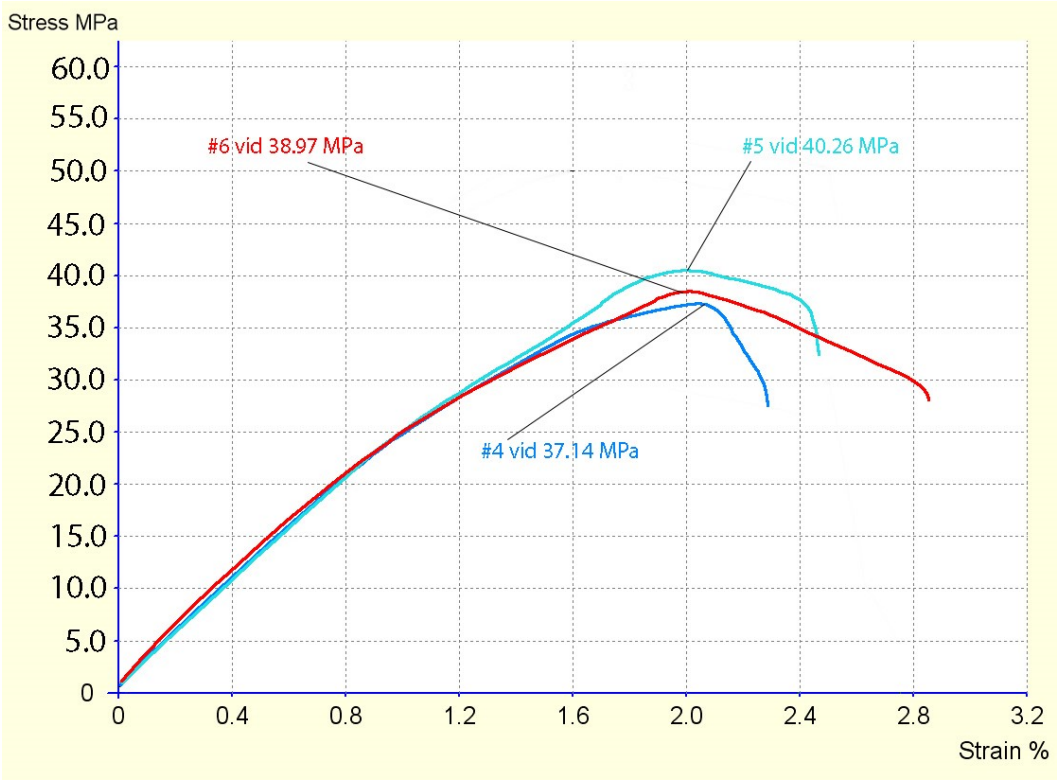


Fig. 8.15. Grafic rezultate încercare la tracțiune – epruvete din ASA printate în vid

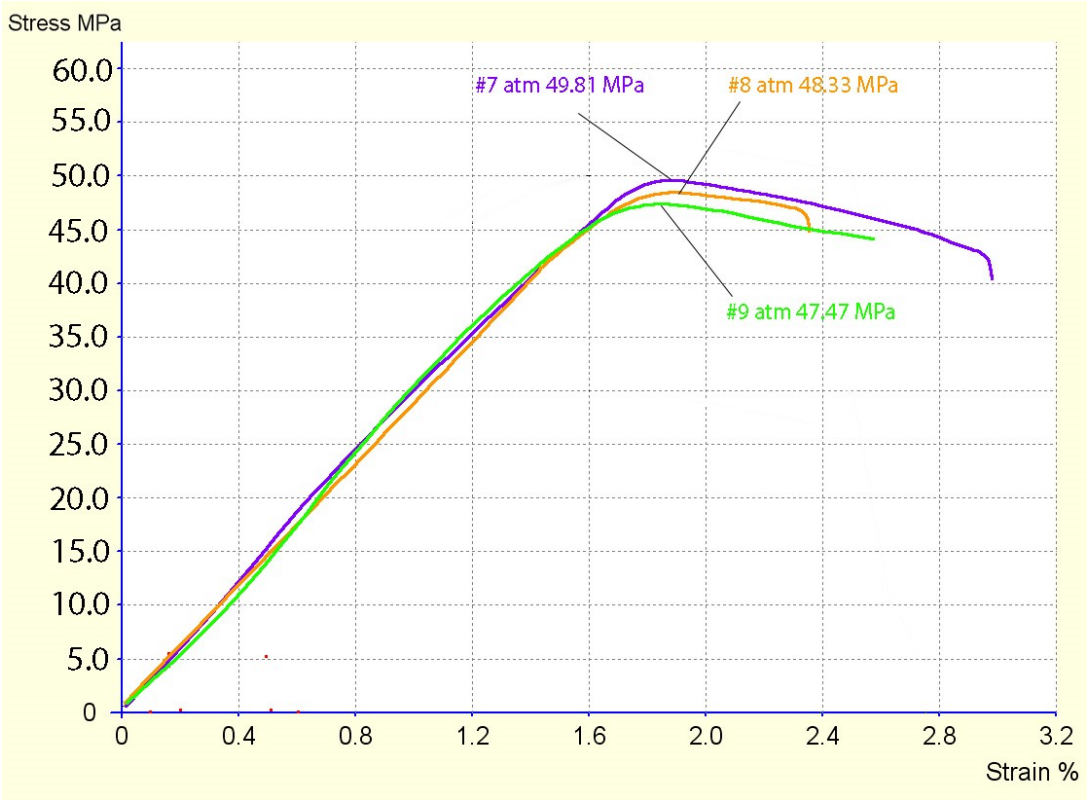


Fig. 8.16. Grafic rezultate încercare la tracțiune – epruvete din ULTEM 1010 printate în atmosferă

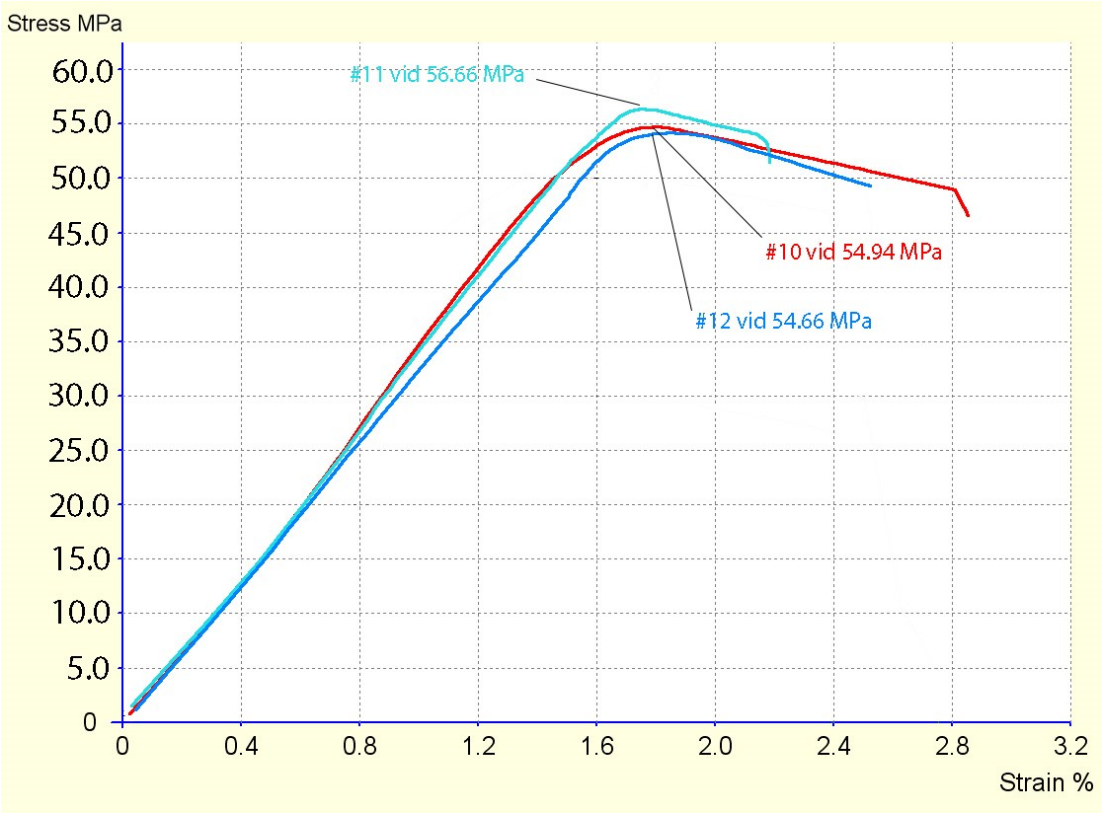


Fig. 8.17. Grafic rezultate încercare la tracțiune – epruvete din ULTEM 1010 printate în vid

Modul de fracturare la tracțiune pentru toate epruvetele din ASA s-a desfășurat de-a lungul filamentelor depuse. Un mod similar de fracturare se regăsește și în cazul pieselor din ULTEM, cu excepția uneia dintre epruvete printată în vid care s-a fracturat transversal, semn că filamentele de material depuse au avut adeziune corespunzătoare.

8.4 COMPORTAMENTUL TERMIC AL PIESELOR PRINTATE 3D DIN ULTEM 1010

O discuție trebuie să fie făcută și în legătură cu transferul termic în piesele printate, pentru a vedea dacă absența aerului în timpul procesului de fabricație produce o diferență semnificativă. Astfel, a fost realizată o termogramă prin calorimetrie cu scanare diferențială (DSC – Differential Scanning Calorimetry) pentru a pune în evidență tranzițiile termice din piesele fabricate, mai exact tranziția vitroasă, care are importanță majoră în determinarea intervalului de temperatură în care pot fi utilizate piesele printate 3D. Câte trei specimene de test au fost printate pentru fiecare dintre cele două cazuri: printare în atmosferă și printare în camera vidată. Acestea au fost analizate folosind o mașină Shimadzu DTA-50 (Shimadzu Corp., Kyoto, Japonia). Primul ciclu de încălzire a fost 20°C – 280 °C cu o rată de creștere a temperaturii de 5°C / min, urmat de răcire până la 30 °C cu o rată de 5°C / min. Al doilea ciclu de încălzire a fost 30 °C – 370 °C cu o rată de 10 °C pe minut. Analiza a fost efectuată într-o atmosferă de azot cu un debit de 85 mL / min. Tranzițiile termice care s-au produs în cel de-al doilea ciclu de încălzire sunt arătate în Fig. 8.19.

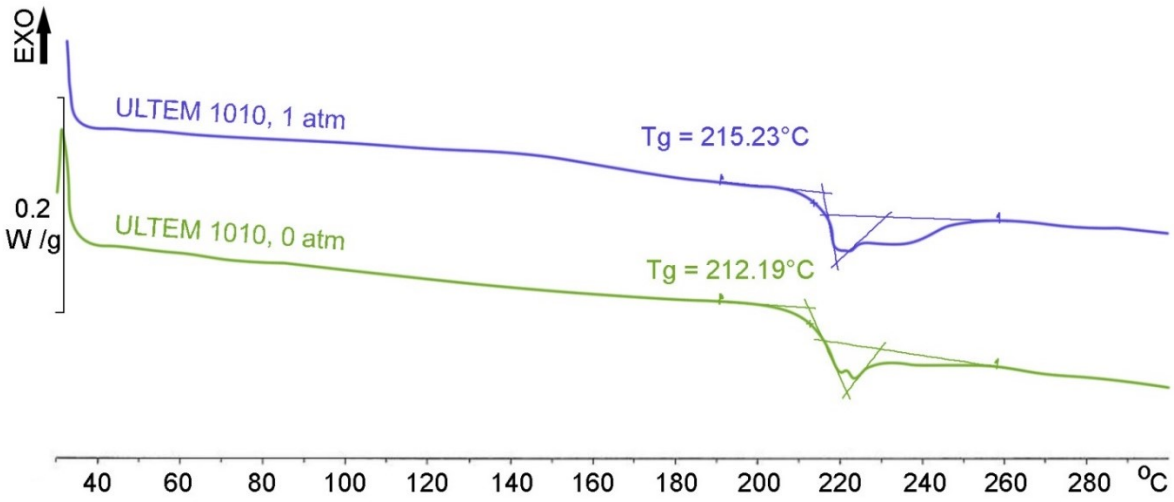


Fig. 8.19. Termogramă prin calorimetrie cu scanare diferențială arătând tranziția vitroasă din al doilea ciclu de încălzire pentru piesele din Ultem 1010

Tranziția vitroasă pentru piese din ULTEM 1010 printate în atmosferă terestră începe la $T_{g,\ 1atm}$ = 215.23 °C și se încheie la $T_{pk,\ 1atm}$ = 218.02 °C. Aceste temperaturi sunt în concordanță cu cele regăsite în fișa tehnică a materialului, precum și în literatura de specialitate. În cazul pieselor printate în incinta vidată, tranziția vitroasă începe de la o temperatură ușor mai scăzută $T_{g,\ 0atm}$ = 212.19 °C și se încheie la $T_{pk,\ 0atm}$ = 220.24 °C. O posibilă explicație pentru acest fenomen ar fi că transferul termic în piesa printată în vid este mai eficient. Întrucât ULTEM 1010 este un material obținut din rășină amorfă, nu există o temperatură de cristalizare, gradul de cristalizare fiind 0. De asemenea, materialul nu prezintă un punct de topire, ci fluiditatea materialului crește o dată depășită temperatura de tranziție vitroasă, atingând o rată de curgere de 17.8 g/10 min sub o sarcină de 6.60 kg, la o temperatură de 337 °C.

CAP. 9 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU

9.1 CONCLUZII GENERALE

În cadrul programului de studii doctorale au fost efectuate cercetări privind posibilitatea de a printa materiale plastice cu puncte înalte de topire într-o incintă cu presiune sub-atmosferică, pentru a reduce sau elimina influența convecției termice asupra proprietăților pieselor printate.

Studiul a început cu analiza tehnicilor și aplicațiilor existente la data curentă și a continuat cu investigarea principalelor tipuri constructive de imprimante 3D cu depunere de filament topit.

În cadrul acestei lucrări au fost studiați parametrii de proces pentru fabricația aditivă prin depunere de filament topit. Parametrii de mediu, dinamici și cei referitori la modul de depunere al filamentului au fost tratați sumar, accentul punându-se pe parametrii termici.

Pentru a vizualiza și analiza modul de transfer al căldurii în piesă în timpul procesului de fabricație, a fost creat un model de analiză termică cu elemente finite. Cu ajutorul acestui model au putut fi observate anumite fenomene, cum ar fi:

- în cazul imprimantelor 3D cu pat încălzit, piesa fabricată se răcește începând cu suprafețele exterioare, patul încălzit având o influență locală, restrânsă la primele straturi de material depus;

- în cazul pieselor înalte, există potențialul reducerii consumului de energie electrică utilizată pentru încălzirea patului, întrucât menținerea temperaturii acestuia nu mai este necesară, excluzând primele straturi depuse, pentru diminuarea variațiilor de temperatură.

Modelul de analiză termică cu elemente finite a fost validat printr-o serie de încercări experimentale, care demonstrează apariția variațiilor de temperatură în interiorul piesei fabricate, prin varierea unor parametri termici, cum ar fi temperatura de depunere, tipul de material (conductivitate termică), temperatura patului încălzit sau temperatura incintei în care se depune materialul. Analizând rezultatele măsurătorilor experimentale, câteva concluzii pot fi formulate:

- căldura se propagă în interiorul piesei în mod similar pentru toate tipurile de material testate;
- influența patului încălzit este mai puternică în cazul pieselor subțiri (dimensiune mică pe axa Z);
- pentru materialele ce necesită temperaturi înalte de depunere, patul încălzit nu reprezintă o variantă eficientă de diminuare a variațiilor de temperatură.
- atât patul încălzit cât și incinta închisă sau încălzită, sunt metode valide de reducere a variațiilor de temperatură apărute în piesă în timpul procesului de fabricație;

În cadrul capitolului 6 a fost adusă în discuție o abordare nouă a problemei fabricării obiectelor din materiale termoplastice cu puncte de topire ridicate prin depunere de filament topit, și anume eliminarea problemelor cauzate de convecția termică prin fabricație în incintă vidată. Această problemă a fost mai întâi analizată prin prisma comportamentului materialelor în vid și la presiuni sub-atmosferice. În cea de-a doua parte a capitolului sunt prezentate elemente de proiectare legate de realizarea unei imprimante 3D cu incintă vidată.

Pentru fabricația aditivă cu material ULTEM, PEEK sau PPSU, duza extruderului trebuie să fie menținută la temperaturi de peste 350 °C. Pentru o astfel de aplicație, modul de monitorizare a temperaturii cu termistor NTC nu este potrivit, fiind necesară schimbarea acestui sistem cu senzori de temperatură PT100 sau cu termocuplă tip K. Aceste variante pot efectua măsuratori precise în domeniul de temperatură 200 ... 400 °C.

Pentru a analiza evoluția termică celorlalte componente componente ale extruderului, s-a recurs la o analiza cu elemente finite a temperaturilor componentelor extruderului atinse în timpul procesului de fabricatie.

Designul extruderului și al analizei cu elemente finite a fost inițial validat analizând performanțele extruderului în parametrii recomandați de către producător, pentru material tip ABS. Apoi, s-a recurs la analiza termică pentru cazul în care elementul ceramic de încălzire ridică temperatura duzei până la 400 °C, temperatura necesară extudării materialelor care fac scopul activităților cercetării doctorale. Comportamentul termic al extruderului în timpul procesului de fabricație aditivă rezultă din combinația a doua mecanisme de transfer termic. În prima faza, duza de extrudare este încălzită de către cartușul ceramic integrat în blocul de aluminiu. Ulterior, căldura este disipată din corpul extruderului prin convecție forțată. O analiză cu elemente finite a fost proiectată pentru a analiza performanța termică a extruderului în timpul procesului de extrudare, în funcție de viteza aerului generat de ventilatorul extruderului.

Analizând rezultatele analizei termice cu elemente finite se poate concluziona că, referitor la tipul contructiv și materialul din care poate fi fabricat un extruder capabil să prelucreze materiale plastice cu temperaturi de topire ridicate (350 .. 400 °C), este necesară înlocuirea componentelor din teflon din dispozitivele din comerț cu componente realizate din oțel inox.

Rezultatele obținute prin analiza termică cu elemente finite au fost confirmate prin testări experimentale, cu senzori de temperatură atașați în diferite puncte pentru două tipuri

constructive de extruder: un extruder cu componente interne din oțel și teflon, și un extruder cu componente interne din oțel inox.

În cadrul literaturii de specialitate există publicații care analizează suprafețele pieselor printate 3D în absența oxigenului. În experimentele prezentate în aceste publicații, înlocuind aerul atmosferic cu gaz inert sau dioxid de carbon s-au produs piese cu proprietăți superioare ale suprafețelor (rugozități, planeități mai bune). În încercarea de a verifica dacă aceste aspecte pot fi repetate în condițiile de presiune scăzută, epruvete-test din material ULTEM 1010 au fost analizate folosind un microscop de forță atomică. În urma acestei investigații s-a constatat că suprafețele pieselor nu au suferit modificări semnificative în urma varierii mediului în care au fost printate.

Douăsprezece epruvete de dimensiuni conform standardului ASTM D638 tip I au fost fabricate în condiții atmosferice și în camera vidată a imprimantei 3D și supuse testării distructive la tracțiune.

Precizia dimensională a pieselor fabricate nu a fost influențată în mod semnificativ de absența aerului din incintă, cu excepția epruvetelor din material ULTEM 1010 care s-au desprins parțial de structura tip "raft" din cauza tensiunilor termice interne atunci când au fost printate în condiții atmosferice.

Rezultatele din figurile 8.14-8.17 arată că impactul absenței aerului este mai redus decât se aștepta în cazul pieselor din ASA, având în vedere similitudinea polimerului cu ABS-ul și precedentele din literatură.

În cazul pieselor fabricate din polimer ULTEM 1010, creșterile de rezistență sunt semnificative, în medie epruvetele printate în vid fiind mai rezistente cu 14% [91].

9.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

Această lucrare abordează problema printării 3D prin depunere de filament topit a materialelor termoplastice care necesită temperaturi mari pentru extrudare. Astfel de temperaturi necesită condiții speciale de printare, întrucât fluctuațiile de temperatură rezultate din interacțiunea piesei cu mediul ambiant duc la apariția defectelor în piese de tipul deformărilor, acumulărilor de material, delaminărilor, etc. După consultarea literaturii de specialitate, care descrie procese precum printarea în incintă încălzită, încălzirea piesei în timpul fabricării cu ajutorul unor lămpi cu lumină infraroșie sau printarea în incintă cu gaz inert, o nouă soluție a fost gândită și anume printarea în absența aerului, în incintă vidată.

Pentru înțelegerea în detaliu a transferului termic în timpul procesului de fabricație în interiorul unei piese produse prin fabricație aditivă prin depunere de filament topit au fost efectuate analize termice cu elemente finite. Metoda aleasă pentru simularea comportamentului termic al pieselor în timpul fabricării strat cu strat este de concepție proprie și prevede analize termice succesive în care se analizează efectul produs de fiecare strat de material nou adăugat asupra straturilor de material depuse anterior. Pe baza acestei analize au fost trasate grafice cu temperaturile în diferite secțiuni ale piesei. Rezultatele analizelor termice cu elemente finite au fost validate și experimental, utilizând senzori de temperatură introduși într-o piesă parelelipipedică în timpul procesului de printare. Din graficele rezultate au fost formulate concluzii privind posibilitatea apraiției tensiunilor termice interne care pot duce la apariția defectelor de tip delaminare, precum și privind influența a diferiți parametri precum temperatura aerului ambiant sau a patului încălzit. Cunoștințele dobândite au fost folosite pentru elaborarea unui studiu privind tratamente termice pentru îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență mecanică pentru piesele fabricate 3D din PETG [92].

De concepție proprie au fost și soluțiile alese pentru realizarea imprimantei 3D cu incintă de printare vidată, și anume:

- Proiectarea structurii de rezistență a incintei vidate și dimensionarea acesteia prin analiză cu elemente finite;

- Proiectarea sistemului de acționare pentru cele trei axe ale imprimantei, precum și a modului de transmitere a mișcării prin pereții camerei vidate.
- Proiectarea sistemului electric;
- Fabricarea sistemelor mai sus menționate.

Analize termice cu elemente finite au fost efectuate și în cazul extruderului de material termoplastic, pentru a determina o combinație de materiale constructive compatibile cu temperaturile necesare pentru procesarea materialelor investigate. Analizele cu elemente finite au fost validate experimental, prin utilizarea senzorilor de temperatură atașați la două tipuri de extrudere.

Cu imprimanta realizată au fost printate 3D epruvete de test care au fost testate distructiv și non-distructiv. Testările non-distructive includ inspectarea suprafețelor laterale ale pieselor cu un microscop de forță atomică pentru identificarea unor potențiale diferențe în ceea ce privește rugozitatea suprafețelor.

Testări distructive au fost efectuate pentru a determina rezistența la tracțiune a pieselor printate în incintă vidată.

Mostre din epruvetele fabricate au fost supuse și unei analize DSC pentru analizarea diferențelor produse de expunerea materialelor la presiuni scăzute.

9.3 DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU

În cadrul acestei lucrări a fost analizată fezabilitatea printării materialelor termoplastice cu temperatură înaltă de extrudare într-o incintă în care se elimină fenomenul de convecție termică prin extragerea aerului cu o pompă de vid. S-a demonstrat că procesul de printare este posibil, fiind proiectată și construită o imprimantă 3D cu incintă de printare vidată. În această incintă au fost printate cu succes epruvete pentru teste distructive și non-distructive, cu o geometrie simplă. O direcție de urmat în viitor este stabilirea unui profil de parametri de proces care să țină cont de geometria piesei printate în așa fel încât transferul termic realizat prin conducția termică prin materialul depus să permită răcirea uniformă a pieselor.

Întradevăr, din punct de vedere tehnic, soluția folosirii unei camere vidate este mai complexă decât anumite alternative, precum încălzirea incintei sau înlocuirea atmosferei cu gaz inert, dar prezintă și anumite avantaje, cum ar fi eliminarea nevoii de materiale auxiliare (gaz inert) și a problemelor ridicate de alimentarea și stocarea acestora. De asemenea, în absența fenomenului de convecție termică, controlul temperaturii în cazul incintei vidate este mai precis și nu depinde de dimensiunile suprafețelor laterale ale piesei fabricate, ci numai de suprafața aflată în contact cu patul de printare. Totodată, există și aplicații în cazul cărora eliminarea oxigenului împiedică oxidarea materialului, cum ar fi în cazul filamentelor impregnate cu pulberi metalice.

O abordare de interes ar fi combinarea efectului unei camere vidate cu acela de răcire prin convecție forțată, posibilă prin deschiderea supapelor camerei vidate și lăsarea aerului să pătrundă în incintă. După răcire, incinta poate fi vidată din nou. Această combinație de efecte ar permite fabricarea unor piese cu geometrie complexă, cu structuri de genul podurilor suspendate.

BIBLIOGRAFIE

[1] *Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies.* Annual Book of ASTM Standards, **Vol. 10.04**. s.l. : ASTM, 2009.

[2] *I. Gibson, D. W. Rosen, B Stucker*. Additive manufacturing technologies – rapid prototyping to direct digital manufacturing 2nd Ed., Springer, 2015;

[3] *C. W. Hull.* US 4575330 A: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. s.l. : USPTO, 1984.

[4] *H. E. Menhennet, R. B. Brown*. US 5555176 A: Apparatus and method for making three-dimensional articles using bursts of droplets. s.l. : USPTO, 1994.

[5] *A. Shkolnik, H. John, A. El-Siblanni*. US 20050248061 A1: Process for the production of a three-dimensional object with an improved separation of hardened material layers from a construction plane. s.l. : USPTO, 2005.

[6] *C. R. Deckard, J. J. Beaman, J.F. Darrah*. US 5155324 A: Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning. s.l. : USPTO, 1990.

[7] *Wohlers Associates*. Wohlers Report 2013. s.l. : Wohlers Associates, 2013.

[8] *Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies*. ISO/ASTM52915-16: Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2. s.l. : ASTM, 2014.

[9] *P. Reeves, D. Mendis*. The Current Status and Impact of 3D Printing Within the Industrial Sector: An Analysis of Six Case Studies. Bournemouth University IPO, Crown, 2015.

[10] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, D. Popescu*. 3D-Printed shoe last for bespoke shoe manufacturing. 2019, MATEC Web of Conferences 290(1):04001 **(articol indexat BDI in ProQuest).**

[11] *Materialise*. The Hearing-Aid Industry Will Never be the Same Again. s.l. : Materialise, 2000.

[12] *D. Popescu, **A. Zapciu**, C. Tarba, D. Laptoiu*. Fast production of customized three-dimensional-printed hand splints. 2019, Rapid Prototyping Journal, Vol. 26(1), pp. 134–144 **(IF=3.099, Articol în revistă ISI, Q1).**

[13] ***A. Zapciu**, C. G. Amza, C. Rontescu, G. Tasca*. 3D-Printed, Non-assembly, Pneumatically Actuated Mechanisms from Thermoplastic Materials. 2018, Materiale Plastice, Vol. 55(4), pp. 517–520 **(articol indexat BDI in SCOPUS)**.

[14] ***A. Zapciu**, G. Constantin, D. Popescu*. Elastomer overmolding over rigid 3d-printed parts for rapid prototypes. 2018, Proceedings în Manufacturing Systems, Vol. 13(2), pp. 75–80 **(articol indexat BDI in ProQuest, IndexCopernicus).**

[15] *Wohlers Associates*. Wohlers Report 2014. s.l. : Wohlers Associates, 2014.

[16] *K. Backman*. Tinkercad has found a new home at Autodesk. s.l. : www.blog.tinkercad.com, 2013.

[17] *Wohlers Associates.* Wohlers Report 2019. s.l. : Wohlers Associates, 2019.

[18] *Wohlers Associates*. Wohlers Report 2020. s.l. : Wohlers Associates, 2020 .

[19] *Research and Markets.* 3D Printing market global outlook and forecast 2020–2025 report, 2020.

[20] *Sculpteo.* The State of 3D Printing 2020 report, 2020.

[21] *S. Crump*. US 5121329: Apparatus and method for creating three-dimensional objects. s.l. : USPTO, 1989.

[22] *B. N. Turner, S. A. Gold*. A review of melt extrusion additive manufacturing processes. 2015, Rapid Prototyping Journal , **Vol. 21**, pp. 250-261.

[23] *A. Yardimci, T. Hattori, S. I. Guceri*. Thermal Analysis of Fused Deposition. 1997, International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX.

[24] *Wohlers Associates*. Industry Briefing. s.l. : Wohlers Associates, 2012.

[25] *N. de Beer, PhD.* - Sierra College CACT. Additive Manufacturing – Turning mind into matter. 2013.

[26] *R. I. Campbell, D. J. Beer, E. Pei.* Additive Manufacturing în South Africa: building on the foundations. 2011, Rapid Prototyping Journal, **Vol. 17**, pp. 156-162.

[27] *M. Breitkopf.* A Makerspace takes over a local library. s.l. : Syracuse University – School of Information Studies, 2011.

[28] *R. Gallant, M. Groenendyk.* 3D printing and scanning at the Dalhousie University Libraries: a pilot project. 2013, Library Hi tech, **Vol. 31**, pp. 31–41.

[29] *I. V. Antoniac, D. Popescu, **A. Zapciu**, A. Antoniac, F. Miculescu, H. Moldovan*. Magnesium Filled Polylactic Acid (PLA) Material for Filament Based 3D Printing. 2019, Materials, Vol. 12(5)(719) **(IF=3.057, Articol în revistă ISI, Q2).**

[30] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, D. Popescu*. Paste Extruder—Hardware Add-On for Desktop 3D Printers. 2017, Technologies, Vol. 5, pp 50–63 **(articol indexat BDI in ProQuest)**.

[31] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, D. Popescu*. Dispozitiv tip extruder de materiale maleabile, pentru imprimantă 3D. **Brevet RO 132300B1**, 2019.

[32] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, A. Eythorsdottir, A. Bjornsdottir, J. Borg*. Mechanical properties of 3D printed composites with ABS/ASA substrate and glass fiber inserts. Ianuarie 2019 MATEC Web of Conferences 290(4):04002 **(articol indexat BDI in ProQuest)**.

[33] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, A. Eythorsdottir, A. Bjornsdottir, J. Borg*. Embedding Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fibers în 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Parts. 2019, Polymers, Vol. 11:1125 **(IF=3.426, Articol în revistă ISI, Q1)**.

[34] *A. Wheeler.* Crowds Roar as 3D Printing Filament goes Electric. s.l. : www.3dprintingindustry.com, 2015.

[35] *B. Krassenstein.* Graphene 3D Lab Introduces New Graphene 3D Printing Material. s.l. : www.3dprint.com, 2015.

[36] ***A. Zapciu**, G. Constantin*. Additive manufacturing integration of thermoplastic conductive materials în intelligent robotic end effector systems. 2016, Proceedings în Manufacturing Systems, **Vol. 11**, pp. 201–206 **(articol indexat BDI in ProQuest, IndexCopernicus)**.

[37] ***A. Zapciu**, G. Constantin, D. Popescu*. Adaptive robotic end-effector with embedded 3D-printed sensing Circuits. Ianuarie 2017, MATEC Web of Conferences, 121:08008 **(articol indexat BDI in ProQuest).**

[38] *E. Krassenstein.* Rubber3DPrinting's Conductive TPU Filament Has Incredible Potential for Robotics, Prosthetics and more. s.l. : www.3dprint.com, 2014.

[39] *W. Wang, T. Y. Wang, Z. Yangy, L. Liu, X. Tong.* Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures. 2013 ACM Transactions on Graphics, Article No.: 177.

[40] *J. Vanek, J. A. G. Galicia, B. Benes.* Clever Support: Efficient Support Structure Generation. Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2014.

[41] *J. Kranz, D. Herzog, C. Emmelmann*. Laser additive manufacturing of lightweight structures în TiAl6V4 – a design for manufacturing approach. Munich : s.n., 2014. iLAS.

[42] *I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker*. Additive manufacturing technologies - rapid prototyping to direct digital manufacturing 2nd Ed. s.l. : Springer, 2015, pp 375–397.

[43] *D. Gunther, B. Heymel, J. F. Günther, I. Ederer.* Continuous 3D-printing for additive manufacturing., 2014, Rapid Prototyping Journal, **Vol. 20**, pp. 320–327.

[44] *K. Goldberg, M. Golberg*. XY Interpolation Algorithms..May/June, 1983, Robotics Age.

[45] *S. Graves, J. C. Rocholl* (Rostock) Style Delta Robot Kinematics. s.l. : Published online, 2013.

[46] *D. Popescu*. Modelare tridimensionala si fabricație aditivă. ISBN 978-606-562-514-3 : Editura Aius.

[47] *MIT Center for Bits and Atoms*. Fab Central. [Online] [Cited: 1 20, 2017.] academy.cba.mit.edu/classes/computer_design/index.html.

[48] *D. Popescu, **A. Zapciu**, C. G. Amza, B. Florin, R. Marinescu*. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. 2018, Polymer Testing, **Vol. 69 (IF=3.275, Articol în revistă ISI, Q1).**

[49] *S. N. Halidi, A. Mohd, J. Abdullah*. Moisture and Humidity Effects on the ABS Used în Fused Deposition Modeling Machine. Octombrie 2012, Advanced Materials Research, **Vol. 576**, pp. 641–644.

[50] *A. Malpot, F. Touchard, S. Bergamo.* Effect of relative humidity on mechanical properties of a woven thermoplastic composite for automotive application. s.l. : Elsevier, Mai 2016, Materials & Design, **Vol. 98**, pp. 12–19.

[51] *I. Clavería, D. Elduquea, J. Santolaria, C. Pina, C. Javierre, A. Fernandez.* The influence of environmental conditions on the dimensional stability of components injected with PA6 and PA66. [ed.] Elsevier. Aprilie 2016, Polymer Testing, **Vol. 50**, pp. 15–25.

[52] *K.G. Jaya Christiyan, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu.* A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. s.l. : IOP Publishing , 2016. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 114 .

[53] *J. W. Zhang, A. H. Peng.* Process-parameter optimization for used deposition modeling based on Taguchi method. 2012, Advanced Materials Research, **Vol. 538**, pp. 444–447.
[54] *G.P. Kumar, S.P Regalla.* Optimization of support material and build time în fused deposition modeling (FDM). 2012, Applied Mechanics and Materials, **Vol. 110**, pp. 2245–2251.
[55] *S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. 4, 2002, Rapid Prototyping Journal, **Vol. 8**, pp. 248–257.
[56] *O. Lužanin, D. Movrin, M. Plančak.* Effect of layer thickness, deposition angle, and infill on maximum flexural force în FDM-built specimens. 2014, Journal for Technology of Plasticity **Vol. 39**.
[57] *K. Thrimurthulu, P.M. Pandey, N.V. Reddy.* Optimum part deposition orientation în fused deposition modeling. s.l. : Elsevier, 2004, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **Vol. 44**, pp. 585–594.
[58] *M. Domingo-Espin,.* S. Borrós, N. Agulló, A. García-Granada, G. Reyes. Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts. 2014, 3D Printing Additive Manufacturing, **vol 1**., pp. 70–77.
[59] *K. Shwetha, H. N. Narasimha Murthy, K. V. S. Rajeswara Rao, N. S. Narahari, R. Agarwal, R. Singh.* Parametric study of Fused Deposition Modelling by Design of Experiments. 2017, International Journal Of Advancement În Engineering Technology, Management and Applied Science, pp. 202–212.
[60] *A. Bagsik, V. Schöppner.* Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ULTEM*9085. 2011. ANTEC.
[61] *H. Brooks, A. E. W. Rennie, T. N. Abram, J. Mcgovern, F. Caron.* Variable Fused Deposition Modelling – Concept Design and Tool Path Generation. Leiria, Portugal : s.n., 2011. Innovative Developments în Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research în Virtual and Rapid Prototyping. pp. 511–517.
[62] *T.Nancharaiah, D. R. Raju, V. Raju.* An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. 2010, International Journal of Emerging Technologies 1(2), pp. 106–111.
[63] *B. Huang, S. H. Masood, M. Nikzad, P. R. Venugopal, A. Arivazhagan.* Dynamic Mechanical Properties of Fused Deposition Modelling Processed Polyphenylsulfone Material. 2015, American Journal of Engineering and Applied Sciences .
[64] *O. Diegel, B. Huang, I. Gibson.* Getting rid of the wires: Curved Layer Fused Deposition Modeling în Conductive Polymer Additive Manufacturing. 2011, Key Engineering Materials, **Vols. 467–469**, pp. 662–667.
[65] *N. A. Sukindar et. al.* Analysis on the impact process parameters on tensile strength using 3D Printer Repetier-Host software. 2017, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences
[66] *C. Page, M. Park, S. Kreuzer, F. Ansari, D. Eason, E. Hamed, H. Watson.* Optimizing 3D Printed Components: A Methodological Approach to Assessing Print Parameters on Tensile Properties. Anaheim, USA : s.n., 2017. SPE ANTE. pp. 82–88.
[67] *N. A. Sukindar et. al.* Analyzing the effect of nozzle diameter în fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3D Printing. 2016, Jurnal Teknologi.
[68] *R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, G. Gomez-Gras.* Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. 2016, Mechatronics, **Vol. 36**, pp. 119–126.
[69] *A. Bellini, S. Guceri, M. Bertoldi.* Liquifier Dynamics în Fused Deposition. 2, 2004, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **Vol. 126**, pp. 237–246.
[70] *University of Cairo*. MPE 635: Electronics Cooling. [Online] [Cited: 12 21, 2016.] http://pathways.cu.edu.eg/ec/.
[71] *Nickel, A. H, Barnett, D. M. and Prinz, F. B.* Thermal Stresses and Deposition Patterns în Layered Manufacturing. 2001, Materials Science and Engineering: A, **Vol. 317**, Issues 1–2, pp. 59–64.
[72] *R. K. Sahu, S. Mahapatra, A.K. Sood,* A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic., 2013, Journal for Manufacturing Science and Production, **Vol. 13**, pp. 183–197.
[73] *Y. Zhang, K. Chou.* A parametric study of part distortions în fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. 2008. IMechE **Vol. 222** Part B: J. Engineering Manufacture. pp. 959–967.

[74] *M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-Forcada, A-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, G. Reyes.* Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. 2015, Materials & Design, **Vol 83**, pp. 670–677.
[75] *C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian.* Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling. [book auth.] Murat Gokcek. Mechanical Engineering. s.l. : InTech, 2012, Ch. 7.
[76] *M. Montero, S. Roundy, D. Odell.* Material characterization of fused deposition modeling ABS by designed experiments. Cincinnati, OH, SUA : s.n., 2001. Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference.
[77] *A. Yardimci, T. Hattori, S. Guceri.* Thermal Analysis of Fused Deposition. 1997, Rapid Prototyping Journal, pp. 689–698.
[78] *I. Gestring, D. Mewes.* Degassing of molten polymers. 16, August 2002, Chemical Engineering Science, **Vol. 57**, pp. 3415–3426.
[79] *E.W. Roberts, M.J. Todd.* Space and vacuum tribology. 1, February 1990, Wear, **Vol. 136**, pp. 157–167.
[80] *A. Merstallinger, E.S. Semerad, B.D. Dunn.* Cold Welding due to Fretting under High Vacuum, Helium and în Air. ESTEC, Noordwijk, ESA : s.n., 1997. 7th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. p. 223.
[81] *A. Merstallinge, E.S. Semerad, B.D. Dunn.* Influence of Coatings and Alloying on cold welding due to impact and fretting. San Sebastián, Spain : s.n., 2003. Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium.
[82] *L.D. Jaffe, J. B. Rittenhouse.* Behavior of Materials în Space Environments, Report No. 32–150 CIO, JPL;. JPL. s.l. : Report No. 32–150 CIO.
[83] *H. E. Frankel.* Effect of vacuum on materials. 6th ESRO Summer School lecture.
[84] *Baza de date pentru rate de degazare*, „Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials Online". [Online] 03 25, 2018. outgassing.nasa.gov.
[85] *F. Lederle, F.Meyer, G-P. Brunotte, C. Kaldun, E. G. Hübner.* Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen . 2016, Prog Addit Manuf, **Vol. 1**, pp. 3–7. DOI 10.1007/s40964-016-0010-y.
[86] *Pololu*. Driver motor pas cu pas Allegro A4988. [Online] [Cited: 07 18, 2019.]
[87] *Marlin*. Marlin Firmware. [Online] [Cited: 07 18, 2019.] http://marlinfw.org/.
[88] *ASTM International*. ASTM D638 – 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2014.
[89] *SNH Mazlan, et al.* Influence of inert gas assisted 3D printing machine on the surface roughness and strength of printed components. 2018. Mechanical Engineering Research Day, At Malaysia.
[90] wikipedia.org. Microscopie de forță atomică. [Online] [Cited: 07 19, 2019.] Licență de liberă distribuție CC BY-SA 4.0.
[91] ***A. Zapciu**, G. Constantin*, Mechanical properties of thermoplastic polymers 3d printed in a low vacuum environment, Proceedings in Manufacturing Systems, **Vol. 15**, Issue 4, 2020, pp. 185-190 **(articol indexat BDI in ProQuest, IndexCopernicus).**
[92] *C. G. Amza, **A. Zapciu**, G. Constantin, F. Baciu, M. I. Vasile.* Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts. Polymers 2021, **Vol. 13**, 562. https://doi.org/10.3390/polym13040562, Published: 13 Feb 2021, WOS:000624260800001 **(IF=3.426, Articol în revistă ISI, Q1).**