

# STUDIUL COMPORTĂRII TERMICE ÎN FABRICAȚIA ADITIVĂ PRIN EXTRUDARE DE FILAMENTE DE MATERIAL

RÎNJA Mădălin – Ionuț<sup>1</sup>

Conducător științific: Conf. dr. ing. **Diana POPESCU**  
Prof. dr. ing. **Cristina PUPĂZĂ**

**REZUMAT:** Expirarea brevetelor mai multor procedee de fabricație aditivă a determinat dezvoltarea domeniului și prin aportul comunităților pasionaților în domeniu. Expansiunea continuă a acestor comunități a condus implicit la îmbunătățirea continuă a acestor procedee, în special a celui construiește obiecte prin extrudare de filamente de material (FDM –Fused Deposition Modeling), prin modificări și optimizări de software și/sau ale componentelor hardware.

Cercetarea prezentată în acest studiu are în vedere studiul comportamentului termic al pieselor obținute prin extrudare de filamente de material. În acest scop s-au utilizat programe software pentru analiză cu elemente finite (BetaCAE Ansa, Dassault Systemes Abaqus, BetaCAE metaPost). Rezultatele au scos în evidență distribuția termică la nivelul piesei obținute după depunerea mai multor rânduri de filament de material. Abordarea propusă urmează a fi validată experimental.

**CUVINTE CHEIE:** printare 3D, FDM, analiza cu elemente finite, comportament termic.

## 1 INTRODUCERE

Fabricația aditivă sau Printarea 3D reprezintă procesul de alipire a materialelor pentru a obține piese / obiecte pe baza datelor unui model virtual 3D, de obicei strat peste strat, spre deosebire de fabricația prin eliminare de material și de procedeele de fabricație prin redistribuire de material [1].

La momentul actual există mai multe tipuri de procedee de fabricație aditivă, șapte dintre acestea fiind standardizate. Procedeele FDM (Fused Deposition Modeling) extrudează și depune un material, adus în prealabil la temperatura de curgere, printr-un orificiu sau duză. Capul de extrudare depune rânduri de material care formează straturi, iar apoi straturile sunt suprapuse pentru formarea piesei. Depunerea materialului pe fiecare strat se face pe baza datelor obținute în etapa de secționare (*slicing*) a modelului STL al obiectului.

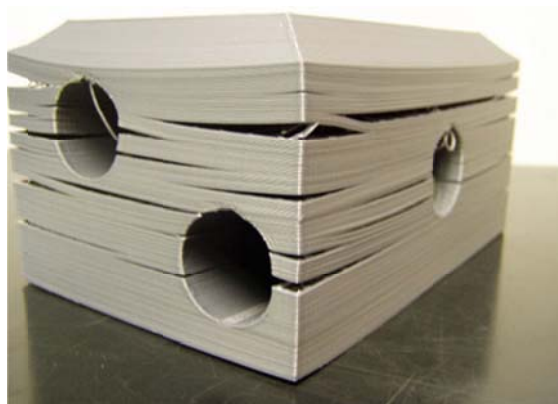
## 2 STADIUL ACTUAL

### 2.1 Necesitatea studiului

Scopul acestui studiu este de a determina distribuția temperaturii la nivelul pieselor obținute prin fabricație aditivă în timpul printării propriuzise a acestora. Studiul se aplică atât echipamentelor de fabricație aditivă cu software *open source*, cât și celor cu software închis, atât

echipamentelor industriale cât și a celor de tip printere 3D desktop.

Determinarea parametrilor care țin de regimurile termice aplicate are ca scop final evitarea defectelor apărute la nivelul pieselor obținute (Fig.1 – defect de tip delaminare) și totodată creșterea calității generale a acestora.



**Fig. 1 Defect cauzat de nerespectarea regimurilor termice [2]**

### 2.2 Studiul literaturii de specialitate

În literatura de specialitate din domeniul fabricației aditive, analiza cu elemente finite este, de obicei, concentrată pe trei direcții: analiza comportamentului termic al capului de extrudare; studii de rezistență pentru piesele fabricate prin procedee de printare 3D în vederea optimizării formei lor geometrice; studiul componentelor echipamentelor de fabricație aditivă solicitate din

<sup>1</sup> Specializarea Managementul Intreprinderilor Industriale Virtuale, Facultatea IMST;

E-mail: [madalin.rinja@gmail.com](mailto:madalin.rinja@gmail.com);

punct de vedere mecanic în timpul funcționării echipamentului.

Nobuyuki Umetani împreună cu Ryan Schmidt de la departamentul de cercetare al Autodesk, au studiat tensiunile apărute la nivelul secțiunilor transversale ale unor obiecte fabricate prin 3D Printing [3]. Aceștia au realizat un model matematic care sa ajute la optimizarea topologică a obiectelor obținute prin procedeul FDM (Fig. 2).

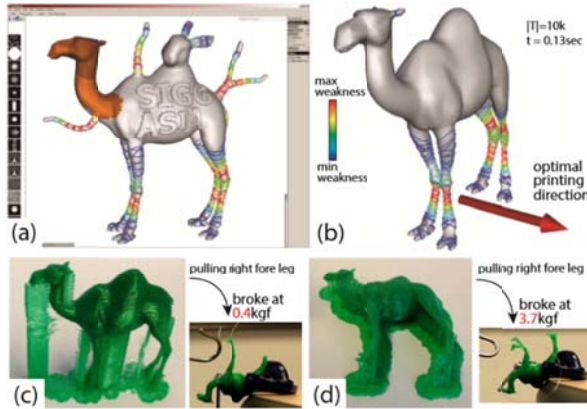


Fig. 2 Studiul de optimizare topologică pentru piesele obținute prin procedeul FDM [3]

În ceea ce privește regimurile termice aplicate procedeeului FDM, au fost mai multe studii, în primul rând la nivelul subsistemului de extrudare. De exemplu, Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J.A., Gomez-Gras G., Llumà-Fuentes J., TraverRamos O. [4] au analizat comportarea termică a unor extrudare în timpul procesului de extrudare la cald ( $200^{\circ}C$ ) pentru materiale de tip ABS (Acrilonitril butadien stiren). Rezultatul studiului a dus la obținerea unei geometrii a capului de extrudare optimizată din punct de vedere a distribuției termice, și implicit la îmbunătățirea întregului proces.

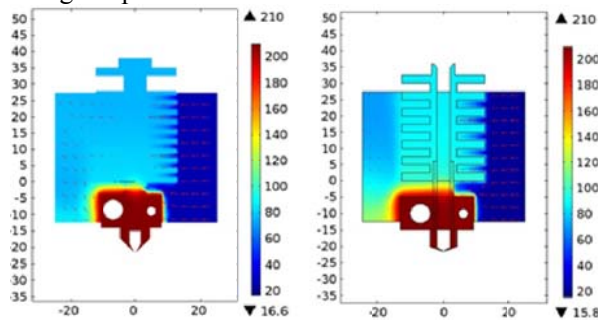


Fig. 3 Studiul comparativ al distribuției termice pe diferite configurații geometrice ale subsistemului de extrudare de la procedeul FDM [4]

Sidonie Costa, Fernando Duarte și José A. Covas [5] de la University of Minho din Portugalia

au studiat fenomenul transferului termic în fabricația aditivă prin extrudare de material. Aceștia au realizat un model matematic utilizând programul software MATLAB prin care au determinat evoluția temperaturii filamentelor în timpul depunerii acestora. Secvențele depunerii succesive de material au fost reprezentate matematic prin intermediul unor matrici de  $m$  linii și  $n$  coloane, liniile reprezentând numărul de straturi iar coloanele – numărul filamentelor de material extrudat dintr-un strat al unei secțiuni transversale la un moment-dat. Completarea liniilor și coloanelor matricilor s-a realizat notându-se cu cifra 1 pentru filamentele de material de construcție, cu cifra 2 pentru filamentele de material pentru structura suport, cu cifra 0 pentru absența filamentului de material la momentul  $t_x$  asociat matricii respective (Fig. 4).

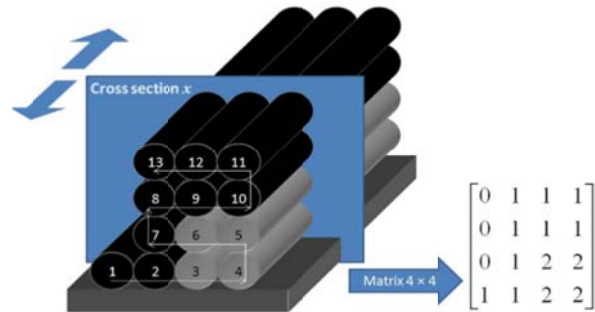


Fig. 4 Reprezentare matematică matriceală a secvenței de depunere a straturilor dintr-o secțiune transversală [5]

În ciuda tuturor studiilor efectuate, există totuși o lacună de cunoștințe în literatura de specialitate în ceea ce privește comportarea termică și termo-mecanică a materialelor utilizate în procesul FDM începând de la stadiul de filament vâcos din momentul ieșirii din capul de extrudare și până la depunere, aderare la straturile depuse anterior și în final solidificare.

### 3 METODA DE LUCRU ABORDATĂ

Abordarea propusă în lucrarea de față este una inovativă din perspectiva studiului bibliografic realizat.

Determinarea parametrilor care țin de regimurile termice aplicate prezintă un real interes și pot aduce plus-valoare procesului de fabricație aditivă prin procedeul FDM. Prin modul de manipulare a acestor parametri se pot evita defectele apărute la nivelul pieselor printate 3D și totodată se poate crește substanțial calitatea generală a acestora. Pentru partea de realizare a modelului discretizat, definire de suprafețe de

contact, delimitare de rânduri de elemente, s-a utilizat programul software BetaCAE ANSA (Fig. 5).

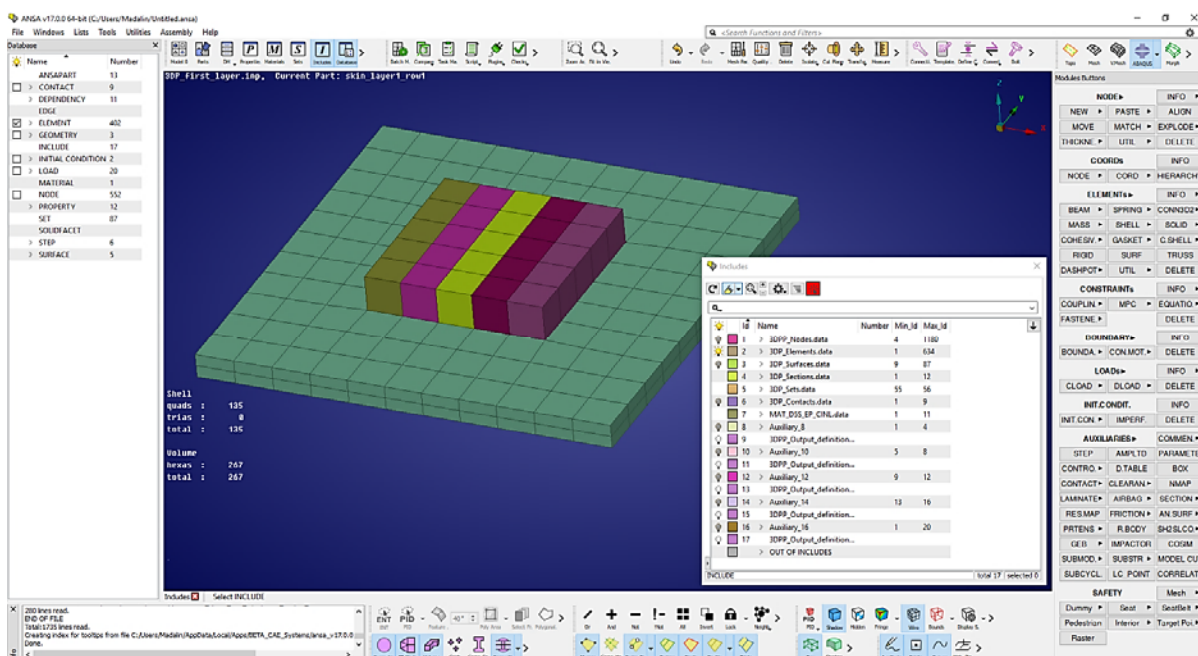


Fig. 5 Realizarea rețelei de discretizare utilizând programul software BetaCAE ANSA

S-a realizat un model FE (model element finit) alcătuit din cinci rânduri a câte cinci elemente fiecare. Fiecare rând a reprezentat (într-un mod simplificat) câte un filament de material extrudat. Rândurile au fost alocate unor Part ID-uri diferite, în ideea de a fi manipulate mai ușor la partea de încărcare a modelului.

Platforma pe care se construiește piesa a fost modelizată pe două straturi a câte 11x11 elemente.

Fiecare rând de cinci elemente de tip solid a fost învelit cu elemente de tip suprafață (*shell*), având noduri comune cu cele ale elementelor solid, și materializând pielea externă (*skin*) a fiecărui rând. Încărcarea modelului s-a realizat la nivel de înveliș exterior, pe elementele de tip *shell*. Pentru a nu influența negativ rezultatele calculului, tuturor elementelor de tip *shell* care au reprezentat învelișurile exterioare ale fiecărui rând li s-a alocat ca proprietate de grosime valoarea de 0.001 mm. Această tehnică a fost abordată pentru a ușura procesul de scriere a fișierului de input (.inp) pentru solver-ul Abaqus.

Fiecare înveliș extern de elemente de tip *shell* a fost împărțit în câte cinci seturi de elemente, patru dintre seturi conținând elementele fețelor câte unui rând, iar al cincilea conținând cele două elemente ale capetelor de rând. Au rezultat astfel 25 de seturi de elemente, fiecare set reprezentând o suprafață de

contact între filamentul de material extrudat și aer, sau între filament și platforma de construcție.

Tot pentru materializarea unor contacte au fost realizate alte cinci seturi de elemente, acestea conținând elementele platformei care participă la contactul cu filamentele materialului extrudat.

Contactele dintre filamentele de material extrudat nu au fost modelizate, considerându-se faptul că între două filamente de material topit care aderă unul la celălalt există un contact termic perfect. Din aceste considerente s-a ales ca nodurile rețelei de discretizare dintre două rânduri succesive să fie comune, astfel transferul termic între elementele celor două rânduri va avea loc la nivel de nod, și nu la nivel de contact termic, aproximând zona de contact dintre două filamente ca fiind o zonă de material continuă și omogenă.

Pentru ușurința aplicării condițiilor inițiale care țin de temperatură a fost realizat un set cu toate nodurile platformei de construcție, respectiv un set cu toate nodurile piesei printate.

După finalizarea realizării modelului s-a procedat la export sub formă de fișiere text, în format recunoscut de solver-ul Abaqus.

Asamblarea modelului de calcul, încărcarea termică și aplicarea condițiilor analizei s-a realizat la nivel de cod script Abaqus. În figura 6 se observă modul de apelare a fișierelor exportate anterior în vederea asamblării modelului FE, definirea de

constante fizice necesare calculului, precum și aplicarea condițiilor inițiale. În cazul de față, nodurile platformei de construcție au fost încălzite la 30°C iar nodurile piesei printate – la 220°C.

```
*HEADING
Transient Thermal Simulation for PLA
Extrusion of 3DPP
**
**
*PREPRINT, MODEL=NO, ECHO=NO, HISTORY=NO,
CONTACT=YES
*RESTART, WRITE, FREQ=1, OVERLAY
**
**
** Simulation model definition **
**
*INCLUDE, INPUT=3DPP_Nodes.data
*INCLUDE, INPUT=3DP_Elements.data
*INCLUDE, INPUT=3DP_Surfaces.data
*INCLUDE, INPUT=3DP_Sections.data
*INCLUDE, INPUT=3DP_Sets.data
*INCLUDE, INPUT=3DP_Contacts.data
**
**
** Material definition **
**
*INCLUDE, INPUT=MAT_DSS_EP_CINL.data
**
**
** Physical constants **
**
*PHYSICAL CONSTANTS,
STEFAN_BOLTZMANN=5.6696E-11,
ABSOLUTE_ZERO=-0.27315E+03
**
** INITIAL CONDITIONS, TYPE=TEMPERATURE
printed_part_nodes, 220.0, 220.0, 220.0,
220.0, 220.0
platform_nodes, 30.0, 30.0, 30.0, 30.0, 30.0
**
```

Fig. 6. Asamblarea modelului de calcul, apelare fișiere, stabilire condiții inițiale

Fișierul cu nodurile rețelei de discretizare conține patru coloane, prima conținând identificatoarele (id-uri) de nod, iar pe următoarele trei coloane – valorile coordonatelor în sistem cartezian pentru fiecare id de nod. Fișierul cu elementele rețelei de discretizare conține pe prima coloană id-ul de element iar pe următoarele coloane – id-urile nodurilor care definesc acel element.

Fișierul cu suprafețele de contact conține denumirile alocate fiecărei suprafețe de contact și respectiv id-urile elementelor componente ale fiecărei suprafețe de contact. Pentru suprafețele de contact care conțin elemente de tip *shell* se specifică și orientarea normalei la suprafață.

Pentru definirea contactelor s-a realizat un fișier care conține denumirile alocate pentru fiecare contact, suprafețele care sunt implicate în acel contact (și care au fost definite anterior în fișierul de suprafețe), tipul contactului, coeficient de transfer termic (pentru contactele termice), coeficient de frecare (pentru contactele mecanice) etc.

Fișierul cu set-uri conține denumirile alocate fiecărui set și respectiv id-urile elementelor/nodurilor grupate la nivelul aceluși set.

Materialele se pot grupa într-un singur fișier sau se pot crea fișiere diferite pentru fiecare material, cu condiția să se respecte sintaxele de definire a proprietăților și legilor de material. În fișierul de secțiuni se specifică materialul alocat pe fiecare Part ID (PID) sau set de elemente, precum și grosimea alocată ca proprietate pentru elementele de tip *shell*.

Primul STEP de calcul a presupus modificarea modelului inițial prin îndepărtarea tuturor rândurilor de material extrudat cu excepția primului. Totodată au trebuit dezactivate și contactele dintre platforma de construcție și rândurile care au fost eliminate, pentru a izola complet primul rând depus.

În figura 7 se observă sintaxa de început de STEP de calcul de tipul – simulare de transfer termic. Prima etapă a constat în eliminarea celor patru rânduri de elemente, învelișurile exterioare ale acestora și totodată – dezactivarea contactelor dintre rândurile eliminate și platformă.

```
*STEP, INC=200
STEP 1 - First row of layer 1
**
**
*HEAT TRANSFER, DELTMX=100, END=PERIOD
0.1, 10.0, 0.1, 2.0
**
**
*MODEL CHANGE, REMOVE, TYPE=ELEMENT
skin_layer1_row2,
skin_layer1_row3,
skin_layer1_row4,
skin_layer1_row5,
layer1_row2,
layer1_row3,
layer1_row4,
layer1_row5,
**
*MODEL CHANGE, REMOVE, TYPE=CONTACT PAIR
surf_cont_B_1-2, surf_cont_platform_1-2
surf_cont_R_1-2, surf_cont_L_1-1
surf_cont_B_1-3, surf_cont_platform_1-3
surf_cont_R_1-3, surf_cont_L_1-2
surf_cont_B_1-4, surf_cont_platform_1-4
surf_cont_R_1-4, surf_cont_L_1-3
surf_cont_B_1-5, surf_cont_platform_1-5
surf_cont_R_1-5, surf_cont_L_1-4
**
**
** Thermal exchange data
**
**
*FILM, OP=MOD
surf_cont_air_L_1-1, FPOS, 30.0, 0.013
surf_cont_air_R_1-1, FPOS, 30.0, 0.013
surf_cont_air_T_1-1, FPOS, 30.0, 0.013
surf_cont_air_FR_1-1, FPOS, 30.0, 0.013
**
**
** Output definition
**
**
*INCLUDE, INPUT=3DPP_Output_definition.data
**
*END STEP
**
```

Fig. 7 Primul STEP de calcul aferent depunerii primului filament de material extrudat

A doua etapă a primului pas de calcul presupune simularea transferului termic între primul filament de material depus și aer (convecției). S-a utilizat sintaxa pentru convecție, aceasta fiind aplicată celor cinci laturi ale primului rând care sunt supuse convecției în momentul depunerii.

S-a considerat valoarea de 30°C ca temperatură a aerului la nivelul spațiului de lucru al echipamentului de fabricație aditivă. Prin prisma faptului că convecția nu este forțată s-a ales un coeficient al transferului având valoarea de 0.013.

Înainte de sfârșitul primului STEP se apelează fișierul de definiție de rezultate. Acest fișier conține partea de cerințe de calcul, unde se pot cere valori pe anumite noduri/elemente/seturi de noduri sau de elemente etc.

În funcție de rezultatele care se dorește a fi obținute după un calcul, prin scrierea cu atenție sporită a acestui fișier se poate optimiza atât timpul de calcul, dar în special se poate reduce drastic dimensiunea fișierelor de rezultate.

Cel de-al doilea pas de calcul debutează cu aceeași sintaxă de început în care se specifică simularea transferului termic (Fig. 8).

```
*STEP, INC=200
STEP 2 - 2nd row of layer 1
**
*HEAT TRANSFER, DELTMX=100, END=PERIOD
0.1, 10.0, 0.1, 2.0
**
*MODEL CHANGE, ADD, TYPE=ELEMENT
skin_layer1_row2,
layer1_row2,
**
*MODEL CHANGE, ADD, TYPE=CONTACT PAIR
surf_cont_B_1-2, surf_cont_platform_1-2
surf_cont_R_1-2, surf_cont_L_1-1
**
** =====
** Thermal exchange data
** =====
*FILM, OP=MOD
surf_cont_air_L_1-1, FPOS, 30.0, 0.000
**
surf_cont_air_L_1-2, FPOS, 30.0, 0.013
surf_cont_air_T_1-2, FPOS, 30.0, 0.013
surf_cont_air_FR_1-2, FPOS, 30.0, 0.013
**
** =====
** Output definition
** =====
*INCLUDE, INFUT=3DPP_Output_definition.data
**
*END STEP
**
```

**Fig. 8 Al doilea STEP de calcul aferent depunerii celui de-al doilea filament de material extrudat**

Prima etapă constă în adăugarea celui de-al doilea rând de elemente împreună cu învelișul de elemente de tip *shell*. Totodată, se activează contactul termic dintre baza celui de-al doilea rând și

platforma de construcție și respectiv contactul termic dintre primul și cel de-al doilea rând de elemente.

A doua etapă a celui de-al doilea pas de calcul presupune simularea transferului termic dintre cel de-al doilea filament de material extrudat și aer.

Sintaxa pentru convecție s-a aplicat laturii de deasupra și celei din stânga, respectiv capetelor celui de-al doilea rând.

Laturii din dreapta, cea care intră în contact cu primul rând nu i s-a aplicat convecție. Totodată laturii din stânga a primului rând i s-a aplicat din nou sintaxa de convecție, dar cu un coeficient de transfer termic având valoarea 0.000 dat fiind faptul că în momentul depunerii celui de-al doilea rând transferul termic are loc prin contact între cele două rânduri iar convecția nu va mai avea loc în acest caz.

Într-un mod similar primului STEP, înainte de sintaxa de încheiere se apelează fișierul de definiție de rezultate de calcul.

La momentul încheierii celui de-al doilea pas de calcul pe platforma de construcție se află primele două rânduri de elemente, transferul de căldură realizându-se atât prin convecție cu aerul, cât și între cele două rânduri prin intermediul nodurilor rețelei de discretizare comune (conducție în mediu continuu și omogen), dar și prin conducție între platforma de construcție și rândurile depuse (prin intermediul contactelor termice definite anterior).

Următorii pași de calcul, corespunzători depunerii rândurilor trei, patru și cinci sunt definiți într-un mod similar primilor doi pași, și anume: adăugare elemente, activare contacte termice pentru conducție, activare convecție pe suprafețele în contact cu aerul, dezactivare convecție pe suprafețele aflate la interfața între două rânduri adiacente.

## 4 REZULTATE

După terminarea asamblării modelului de calcul, trimiterea spre server, calculul efectiv și primirea fișierelor de rezultate se procedează spre etapa de post-procesare. În acest context s-a utilizat programul software BetaCAE metaPost.

Prin intermediul metaPost, în figura 9, în imaginile notate de la 1 la 10, se pot observa fazele succesive de depunere a rândurilor precum și modul de distribuție termică la nivelul întregului model FE. Figura 9 reprezintă datele de la începutul și sfârșitul fiecărui pas de calcul, dar pot fi vizualizate distribuțiile de temperaturi progresiv pe toată durata oricărui pas.

## 5 CONCLUZII ȘI DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRIILOR

Articolul propune o abordare inovativă în domeniul studiului comportării termice la depunerea filamentelor de material în procedeul FDM în scopul înțelegerii fenomenelor termice care se produc la extrudare și a evitării defectelor determinate de setări incorecte ale parametrilor de proces cum ar fi temperatura de extrudare, temperatura platformei.

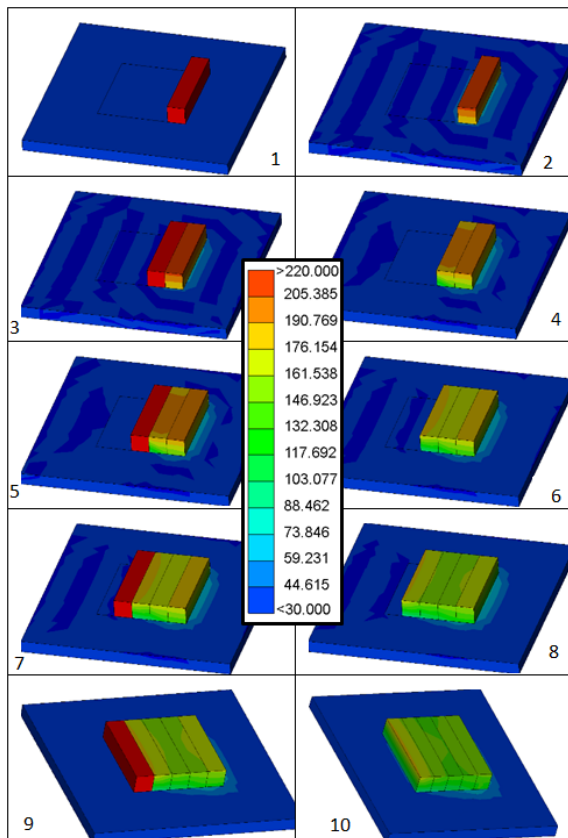


Fig. 9. Fazele succesive ale depunerii rândurilor și distribuția termică surprinsă

Metoda propusă a avut în vedere utilizarea unei suite de programe de analiză prin metoda elementelor finite pentru pre-procesare, solver și post-procesare.

Comportamentul termic a fost realizat pentru ABS, dar aceeași abordare de lucru poate fi aplicată oricărui material de extrudat (PLA – acid polilactic, PC – policarbonat, PETG - polietilene tereftalat glicol modificat, etc.) cu condiția să fie cunoscute toate proprietățile și legile de material.

Rezultatele au arătat modul în care are loc transferul termic între rândurile de material, între rândurile de material și platformă, precum și convecția.

Cercetările în acest domeniu vor fi continuate în vederea creșterii preciziei analizei și a validării modelului realizat. Se are în vedere validarea prin utilizarea unor senzori de temperatură plasați în anumite zone ale piesei în timpul printării 3D, precum și prin utilizarea unei camere cu termoviziune în infraroșu pentru cercetare.

## 6 BIBLIOGRAFIE

- [1]. ISO/ASTM 52921/2013 – Fabricația aditivă. Terminologie.
- [2]. Sbriglia L.R., Baker A.M., Thompson J.M., Bernardin J.D., (2016), “Embedding Sensors în FDM Plastic Parts During Additive Manufacturing”, Topics in Modal Analysis & Testing, Vol. 10, pp. 205-214, Part of the Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series book series, Springer.
- [3]. Umetani N., Schmidt R., (2013), „Cross-Sectional Structural Analysis for 3D Printing Optimization”, Proceeding SA '13 SIGGRAPH Asia 2013 Technical Briefs, Article no. 5.
- [4]. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J.A., Corbella X., Busque R., Gomez-Gras G., (2016), „Finite element analysis of the thermal behaviour of a RepRap 3D printer liquefier”,
- [5]. Costa S., Duarte F., Covas J.A., (2016), „Using MATLAB to Compute Heat Transfer în Free Form Extrusion”, MATLAB – AN Ubiquitous tool for the practical engineer, pp.453-474, disponibil la: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/14967/1/2011-%20matlab\\_in\\_free\\_form\\_extrusion.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/14967/1/2011-%20matlab_in_free_form_extrusion.pdf)