

CERCETARE-DEZVOLTARE-INOVAR-PROIECTARE
RESEARCH-DEVELOPMENT-INNOVATION-DESIGN

Analiza câmpului termic la imprimarea prin procedeul Fused Filament Fabrication cu încălzire hibridă laser-rezistiv

Thermal field analysis in Fused Filament Fabrication printing process using hybrid heating laser-resistive

Remus Socol¹, Ionel-Dănuț Savu², Iulian Ștefan², Sorin-Vasile Savu², Cristian Chihai¹

¹Universitatea din Craiova, PhD student

²Universitatea din Craiova

Rezumat

Lucrarea analizează interacțiunea energetică dintre încălzirea rezistivă a duzei de extrudare și încălzirea suplimentară prin fascicul laser în procesul de imprimare 3D prin procedeul Fused Filament Fabrication (FFF). Studiul abordează modul în care aceste două surse termice influențează câmpul termic al piesei fabricate, aderența între straturi și controlul temperaturii în timpul depunerii materialului. Integrarea unei surse laser alături de încălzirea rezistivă a duzei permite un control mai precis al gradientului termic, esențial pentru îmbunătățirea calității imprimării. Această metodă hibridă reduce răcirea rapidă a stratului depus, optimizează fuziunea inter-strat și diminuează tensiunile interne, având un impact benefic asupra microstructurii și proprietăților mecanice ale piesei. Lucrarea include un model matematic detaliat al fluxului termic generat de laser și duză, echilibrul energetic la suprafața piesei și transmiterea căldurii în profunzime. S-au efectuat calcule numerice și simulări FEA pentru a determina distribuția temperaturii în funcție de puterea laserului (0.5 W și 1 W) și distanța lentilă-piesă (25 mm, 30 mm, 35 mm). Rezultatele indică faptul că distanțe mai mici și puteri mai mari pot duce la supraîncălzirea materialului, în timp ce distanțele mai mari reduc fluxul termic, afectând procesul de fuziune. Utilizarea unei surse termice hibride oferă avantaje semnificative, dar necesită o reglare atentă a parametrilor pentru a preveni degradarea materialului și supraîncălzirea duzei. Optimizarea defocalizării laserului și sincronizarea surselor de căldură sunt esențiale pentru menținerea unui proces stabil și reproductibil. Studiul demonstrează potențialul acestei metode în îmbunătățirea imprimării FFF, mai ales pentru materiale avansate.

Cuvinte cheie

Fabricație aditivă, procedeu FFF, sursă termică hibridă, fascicul laser, flux termic, câmp termic, modelare, simulare

Abstract

The paper analyses the energetic interaction between resistive heating of the extrusion nozzle and additional heating by laser beam in the Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing process. The study addresses how these two heat sources influence the thermal field of the manufactured part, the adhesion between layers and the temperature control during material deposition. The integration of a laser source alongside resistive nozzle heating allows for more precise control of the thermal gradient, essential for improving print quality. This hybrid method reduces rapid cooling of the deposited layer, optimizes inter-layer fusion and reduces internal stresses, having a beneficial impact on the microstructure and mechanical properties of the part. The work includes a detailed mathematical model of the heat flux generated by the laser and nozzle, the energy balance at the part surface and the heat transfer in depth. Numerical calculations and FEA simulations were performed to determine the temperature distribution as a function of the laser power (0.5 W and 1 W) and the lens-part distance (25 mm, 30 mm, 35 mm). The results indicate that shorter distances and higher powers can lead to overheating of the material, while longer distances reduce the heat flux, affecting the fusion process. The use of a hybrid heat source offers significant advantages, but requires careful tuning of parameters to prevent material degradation and nozzle overheating. Optimizing laser defocusing and synchronizing heat sources are essential to maintaining a stable and reproducible process. The study demonstrates the potential of this method in improving FFF printing, especially for advanced materials.

Keywords

Additive manufacturing, FFF process, hybrid thermal source, laser beam, thermal flux, thermal field, modelling, simulation

1. Introducere

Fused Filament Fabrication (FFF), cunoscut și sub denumirea de Fused Deposition Modeling (FDM), este una dintre cele mai populare tehnologii de imprimare 3D. Acest proces utilizează un filament termoplastic, încălzit și extrudat strat cu strat, pentru a construi obiecte tridimensionale pe baza unui model digital.

Imprimarea FFF se bazează pe un proces aditiv, unde materialul este depus succesiv în straturi subțiri pentru a forma un obiect tridimensional. Procedeu are următoarele etape principale:

a) Pregătirea modelului geometric digital - modelul 3D al piesei care trebuie confecționată, este realizat cu ajutorul unui software de modelare CAD și salvat într-un format compatibil, de obicei *.stl sau *.obj. Modelul este apoi procesat de o aplicație care îl „feliază” în straturi. Cu un al treilea modul software modelul digital al piesei „feliată” este convertit într-un set de instrucțiuni G-code, determinând traseul duzei de extrudare și parametrii procesului de imprimare.

b) Alimentarea și încălzirea filamentului - Filamentul din material termoplastic (ex.: PLA, ABS, PETG, TPU) este adus în duza de extrudare de către un sistem de avans care are viteză constantă. Odată intrat în duza de extrudare, filamentul este încălzit până în starea fluid-vâscoasă (duza de extrudare este adusă la temperatura de proces de către un sistem termostatat).

c) Depunerea sub formă de straturi succesive a materialului topit - Duza extrudează materialul topit pe o platformă de depunere, de obicei încălzită. Straturile sunt depuse succesiv, fiecare nou strat îmbinându-se prin sudare în punctele de contact cu stratul precedent. Mișcarea duzei este controlată de un sistem mecanic pe axe X, Y și Z comandat digital.

d) Răcirea și solidificarea - După extrudare, materialul începe să se răcească și să se solidifice rapid. Pentru a preveni deformarea primelor straturi depuse platforma de depunere este uneori încălzită.

e) Post-procesare - După finalizarea imprimării, obiectul poate necesita îndepărtarea unor elemente care au avut rol de suport în timpul fabricației. Eventual, în funcție de necesitățile privind calitatea suprafeței produsului, se vor aplica finisaje suplimentare, precum șlefuire, vopsire sau tratamente chimice.

În ultimii ani, procesele de fabricație asistate termic au evoluat semnificativ, odată cu introducerea unor surse termice hibride care combină mai multe tipuri de energie pentru a optimiza performanțele procesului.

O sursă termică hibridă implică, în general, combinarea

1. Introduction

Fused Filament Fabrication (FFF), also known as Fused Deposition Modeling (FDM), is one of the most popular 3D printing technologies. This process uses a thermoplastic filament, heated and extruded layer by layer, to build three-dimensional objects based on a digital model.

FFF printing is based on an additive process, where material is successively deposited in thin layers to form a three-dimensional object. The process has the following main steps:

a) Preparation of the digital geometric model - the 3D model of the part to be manufactured, is created using CAD modelling software and saved in a compatible format, usually *.stl or *.obj. The model is then processed by an application that “slices” it into layers.

With a third software module, the digital model of the “sliced” part is converted into a set of G-code instructions, determining the extrusion nozzle path and the parameters of the printing process.

b) Filament feeding and heating - The filament made of thermoplastic material (e.g. PLA, ABS, PETG, TPU) is fed into the extrusion nozzle by a constant speed feed system. Once in the extrusion nozzle, the filament is heated to a fluid-viscous state (the extrusion nozzle is brought to the process temperature by a thermostated system).

c) Deposition in the form of successive layers of molten material - The nozzle extrudes the molten material onto a deposition platform, usually heated. The layers are deposited successively, each new layer joining by welding at the points of contact with the previous layer. The movement of the nozzle is controlled by a digitally controlled mechanical system on the X, Y and Z axes.

d) Cooling and solidification - After extrusion, the material begins to cool and solidify rapidly. To prevent deformation of the first deposited layers, the deposition platform is sometimes heated.

e) Post-processing - After printing is complete, the object may require the removal of some elements that served as support during manufacturing.

Depending on the needs for the product's surface quality, additional finishing, such as sanding, painting or chemical treatments, may be applied.

In recent years, thermally assisted manufacturing processes have evolved significantly, with the introduction of hybrid heat sources that combine multiple types of energy to optimize process performance.

A hybrid heat source generally involves the combi-

a două sau mai multe mecanisme de generare a căldurii, cum ar fi: încălzirea rezistivă, fascicule laser, inducție electromagnetică, microunde sau radiație infraroșu, cu scopul de a obține un control superior asupra temperaturii și comportamentului materialului procesat.

În procesele convenționale de fabricație, cum ar fi sudarea, fabricația aditivă (Fabricație Aditivă cu Sârmă topită în Arc - WAAM, Modelare prin Depunere de Lichid - LMD), tratamentele termice locale sau deformarea plastică asistată termic, utilizarea surselor hibride a adus îmbunătățiri esențiale. Prin combinarea mai multor surse de energie, aceste sisteme permit încălzirea rapidă și localizată, controlul mai fin al temperaturii, precum și adaptarea vâscozității materialului în faza topită, esențială în procesele cu flux controlat [1].

În imprimarea 3D FFF sursa principală de energie este tradițional o rezistență electrică [1-3] care încălzește duza de extrudare prin efect Joule. Totuși, acest sistem clasic are limite semnificative, precum răcirea rapidă a stratului depus, lipsa controlului gradientului termic și dificultăți în imprimarea materialelor avansate. Prin integrarea unei surse adiționale, precum fasciculul laser se poate îmbunătăți semnificativ controlul termic al zonei de depunere, facilitând aderența între straturi și reducerea tensiunilor interne [4].

Astfel, dintre avantajele utilizării surselor hibride (rezistiv + laser) se amintesc: îmbunătățirea coeziunii inter-strat, reducerea tensiunilor interne, creșterea calității suprafeței, posibilitatea procesării materialelor avansate și flexibilitatea procesului [4-6]. Pentru un control eficient este necesară sincronizarea surselor, defocalizarea adecvată a laserului, corelarea puterii cu viteza capului de imprimare și monitorizarea temperaturii în timp real [5].

Deși aduc numeroase beneficii, sursele hibride implică și provocări tehnice, precum costuri ridicate, complexitate crescută, necesitatea unui model termic avansat și riscuri optice. Totuși, integrarea lor are un impact pozitiv asupra microstructurii materialului, conducând la o cristalizare mai uniformă, reducerea porozității și creșterea rezistenței mecanice a pieselor fabricate aditiv [5-6].

În concluzie, sursele hibride reprezintă o direcție revoluționară pentru optimizarea imprimării FFF, permițând producerea de piese complexe și performante. Prezenta lucrare își propune să stabilească prin studiu analitic configurația câmpului termic la nivelul duzei de extrudare parțial expusă la radiația laser, precum și efectul funcționării simultane a celor două surse termice asupra încălzirii materialului.

nation of two or more heat generation mechanisms, such as: resistive heating, laser beams, electromagnetic induction, microwaves or infrared radiation, in order to achieve superior control over the temperature and behaviour of the processed material.

In conventional manufacturing processes such as welding, additive manufacturing (Wire Arc Additive Manufacturing- WAAM, Liquid Deposition Modeling - LMD), local heat treatments or thermally assisted plastic deformation, the use of hybrid sources has brought essential improvements. By combining multiple energy sources, these systems allow for rapid and localized heating, finer temperature control, as well as the adaptation of the material viscosity in the molten phase, essential in controlled flow processes [1].

In FFF 3D printing, the main energy source is traditionally an electrical resistor [1-3] that heats the extrusion nozzle via the Joule-Lenz effect. However, this classic system has significant limitations, such as rapid cooling of the deposited layer, lack of thermal gradient control, and difficulties in printing advanced materials. By integrating an additional source, such as a laser beam, the thermal control of the deposition zone can be significantly improved, facilitating inter-layer adhesion and reducing internal stresses [4].

Thus, the following advantages of using hybrid sources (resistive + laser) should be reminded: improved interlayer cohesion, reduced internal stresses, increased surface quality, the possibility of processing advanced materials, and process flexibility [4-6]. For effective control, synchronization of the sources, appropriate laser defocusing, power correlation with print head speed, and real-time temperature monitoring are required [5].

Although they bring many benefits, hybrid sources also involve technical challenges, such as high costs, increased complexity, the need for an advanced thermal model, and optical risks. However, their integration has a positive impact on the material microstructure, leading to more uniform crystallization, reduced porosity, and increased mechanical strength of additively manufactured parts [5-6].

In conclusion, hybrid sources represent a revolutionary direction for optimizing FFF printing, enabling the production of complex and high-performance parts.

This paper aims to establish through analytical study the configuration of the thermal field at the level of the extrusion nozzle partially exposed to laser radiation, as well as the effect of the simultaneous operation of the two thermal sources on the heating of the material.

2. Analiza sistemului hibrid de încălzire

2.1 Sistemul hibrid rezistiv - laser

Sistemul hibrid de încălzire constă în adăugarea la sistemul tradițional rezistiv de încălzire a unei surse suplimentare, cu scopul de a acționa pe o suprafață limitată în zona de depunere, astfel încât să se reducă viteza de răcire a materialului polimeric depus. Cea de-a doua sursă termică este un fascicul laser și este atașată sistemului de depunere conform schiței din figura 1. Geometria sistemului are mai mulți parametri reglabili, doi dintre aceștia fiind unghiul de înclinare al fasciculului laser și distanța de la lentila finală a dispozitivului și punctul în care axa fasciculului atinge suprafața piesei construite prin depunere de material.

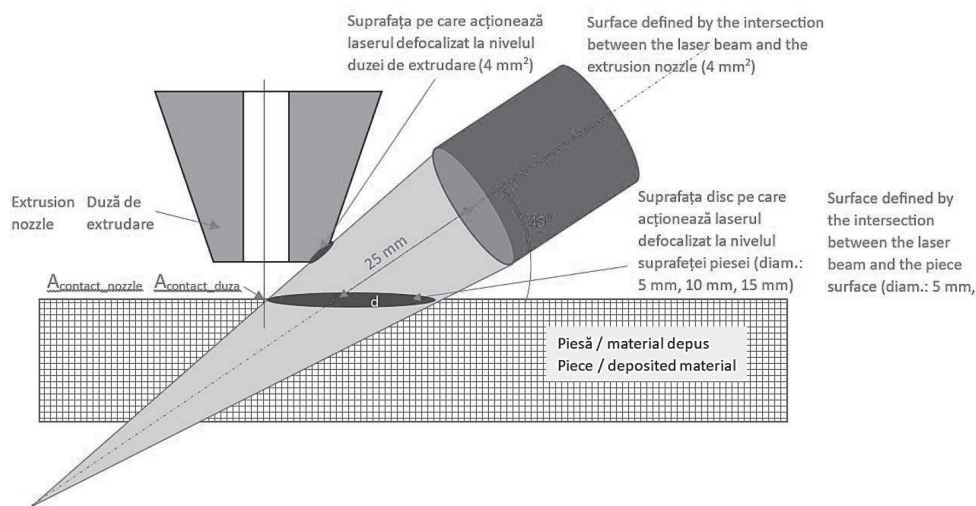


Figura 1. Sistemul hibrid rezistiv – laser de încălzire

Figure 1. Resistive – laser hybrid system for heating

Intersecția dintre fasciculul laser și suprafața piesei este o formă geometrică eliptică având o rază medie. Poziționarea acestei forme eliptice relativ la zona de depunere se poate alege în mai multe moduri: poate fi centrată pe punctul de depunere, poate fi tangentă punctului de depunere sau în alte moduri. Pentru analiza care urmează se consideră că suprafața eliptică este tangentă punctului de depunere. În această poziție fasciculul laser atinge pe o anumită suprafață și duza de extrudare, aducând un aport termic și la nivelul acesteia.

Această supraîncălzire a duzei de extrudare nu este neapărat de dorit, fiindcă va mări și temperatura materialului polimeric, făcându-l mai fluid și mai dificil de așezat. Din acest motiv ar trebui ca acest aport să nu existe sau să fie minim, dar forma și dimensiunile reale ale dispozitivului laser nu permit evitarea atingerii duzei de extrudare de către fasciculul laser. Există, așadar, pe lângă încălzirea zonei de depunere

2. Analysis of the hybrid heating system

2.1 Resistive–laser hybrid system

The hybrid heating system consists of adding an additional source to the traditional resistive heating system, in order to act on a limited surface in the deposition area, so as to reduce the cooling rate of the deposited polymeric material. The second thermal source is a laser beam and is attached to the deposition system according to the sketch in figure 1.

The geometry of the system has several adjustable parameters, two of which are the inclination angle of the laser beam and the distance from the final lens of the device and the point where the beam axis touches the surface of the part built by material deposition.

The intersection between the laser beam and the surface of the part is an elliptical geometric shape with an average radius. The positioning of this elliptical shape relative to the deposition area can be chosen in several ways: it can be centered on the deposition point; it can be tangent to the deposition point or in other ways. For the following analysis, it is considered that the elliptical surface is tangent to the deposition point. In this position, the laser beam touches the extrusion nozzle on a certain surface, bringing a thermal input to its level as well.

This overheating of the extrusion nozzle is not necessarily desirable, because it will also increase the temperature of the polymer material, making it more fluid and more difficult to place. For this reason, this input should not exist or be minimal, but the actual shape and dimensions of the laser device do not allow the laser beam to reach the extrusion nozzle.

Therefore, in addition to heating the deposition

și o încălzire a duzei de extrudare, ambele trebuind să fie controlate. Pentru putea exercita un astfel de control trebuie cunoscute unele elemente de configurație ale câmpurilor termice de la suprafața piesei depuse și de la suprafața duzei de extrudare.

2.2 Modelarea interacțiunii energetice a celor două surse termice ale sistemului

Analiza sistemului hibrid laser-rezistiv din punct de vedere al interacțiunii energetice fascicul laser – duza de extrudare este una dintre componentele necesare optimizării sistemului de încălzire. O astfel de analiză investighează interacțiunea dintre cantitatea de energie calorică adusă într-o anumită perioadă de timp în zona de depunere de către fasciculul laser și cantitatea de energie calorică produsă rezistiv la nivelul duzei de extrudare. Se analizează, așadar, modul în care contribuie atât laserul, cât și rezistența electrică a duzei la încălzirea întregului sistem, pentru diferite distanțe de defocalizare și două niveluri de putere ale laserului (0.5 W, 1 W). Fluxul de putere al fasciculului laser defocalizat pe unitatea de suprafață este descris de relația:

$$q'' = \frac{P_{laser}}{A_{spot}} \quad (1)$$

unde P_{laser} reprezintă puterea fasciculului laser, iar A_{spot} reprezintă aria spotului creat de fasciculul laser pe suprafața materialului depus.

Mărimea q'' exprimă cantitatea de putere pe metru pătrat care este transferată materialului. Cu cât spotul laserului este mai mic, cu atât fluxul este mai mare, însă un spot cu o arie prea mică ar putea produce o încălzire termică prea mare a materialului, rezultând astfel degradarea termică a acestuia. Acesta este motivul pentru care fasciculul laser este defocalizat la suprafața materialului. Aria spotului laser defocalizat este circulară, așadar:

$$A_{spot} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2)$$

unde d este diametrul spotului produs de fasciculul laser, suprafața de transfer depinzând de diametrul fasciculului defocalizat.

Echilibrul energetic la suprafață este:

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

unde:

- q'' : Fluxul de căldură la suprafață (cantitatea de energie transmisă pe unitatea de suprafață), [W/m²]
- h : Coeficientul de convecție (depinde de viteză aer, geometrie, temperaturi), [W/m²·K]
- T_s : Temperatura suprafeței (cea pe care vrem să o calculăm sau să o monitorizăm), [K]

area, the extrusion nozzle is also heated, which must be controlled. To be able to exercise such control, some configuration elements of the thermal fields on the surface of the deposited part and the surface of the extrusion nozzle must be known.

2.2 Modelling the energy interaction of the two thermal sources of the hybrid system

The analysis of the hybrid laser-resistive system from the point of view of the energy interaction between the laser beam and the extrusion nozzle is one of the components necessary for optimizing the heating system. Such an analysis investigates the interaction between the amount of heat energy brought in a specific time to the deposition zone by the laser beam and the amount of heat energy produced resistively at the extrusion nozzle. It is therefore analysed how both the laser and the electrical resistance of the nozzle contribute to the heating of the entire system, for different defocus distances and two laser power levels (0.5 W, 1 W).

The power flux per unit area of the defocused laser beam is described by the relationship:

$$q'' = \frac{P_{laser}}{A_{spot}} \quad (1)$$

where P_{laser} represents the power of the laser beam, and A_{spot} represents the area of the spot created by the laser beam on the surface of the deposited material. The size q'' expresses the amount of power per square meter that is transferred to the material. The smaller the laser spot, the higher the flux, but a spot with too small an area could produce too high a thermal load on the material, resulting in its thermal degradation. This is why the laser beam is defocused at the surface of the material. The area of the defocused laser spot is circular, so:

$$A_{spot} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2)$$

where d is the diameter of the spot produced by the laser beam, the transfer area depending on the diameter of the defocused beam.

The energy balance at the surface is:

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

where:

- q'' : Surface heat flux (amount of energy transmitted per unit area), [W/m²]
- h : Convection coefficient (depends on air speed, geometry, temperatures), [W/m²·K]
- T_s : Surface temperature (the one we want to calculate or monitor), [K]

- T_{∞} : Temperatura mediului ambiant (exterior), [K]
- ε : Emisivitatea suprafeței (0-1), adimensional (cât de eficient radiază suprafața comparativ cu un corp negru), [-]
- σ : Constanta lui Stefan-Boltzmann, [W/m²·K⁴]
- $T_s^4 - T_{\infty}^4$: diferența de temperatură la puterea a patra (pentru radiație termică), [K⁴].

Această ecuație a fluxului de căldură la suprafață exprimă echilibrul energetic pentru o suprafață expusă la o sursă de căldură, într-un proces de transfer de căldură combinat: convecție (către mediu) și radiație (emisivitatea suprafeței). Ea este folosită pentru determinarea temperaturii de echilibru a unei suprafețe încălzite (ex: piesa la imprimare 3D, duza), pentru estimarea fluxului de căldură care trebuie gestionat de sistem și pentru calculele de echilibru termic în procesele asistate de surse hibride (ex: rezistivă + laser).

Termenul din stânga ecuației (q'') reprezintă fluxul de căldură impus asupra suprafeței (ex. fasciculul laser, sursă rezistivă). Termenul din dreapta ecuației reprezintă fluxurile de căldură care ies din suprafață:

- $h \cdot (T_s - T_{\infty})$ este căldura pierdută prin convecție spre mediu.
- $\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4)$ este căldura pierdută prin radiație.

Pentru ca suprafața să ajungă la o temperatură T_s stabilă, fluxul primit trebuie să fie egal cu fluxul cedat. Temperatura în profunzimea materialului se poate exprima cu relația:

$$T(z) = T_s - \frac{q''}{k} \cdot z \quad (4)$$

unde:

$T(z)$: temperatura la adâncimea z [K]

T_s : temperatura suprafeței [K]

q'' : fluxul de căldură [W/m²]

k : conductivitatea termică [W/m·K]

z : adâncimea în material [m].

Această relație arată distribuția temperaturii în profunzime, scăzând liniar cu adâncimea pentru model simplificat.

Puterea absorbită de duza intersectată parțial cu fasciculul laser este:

$$P_{duza} = q'' \cdot A_{contact_duza} \quad (5)$$

unde $A_{contact_duza}$ este suprafața pe care fasciculul laser atinge suprafața duzei.

Făcând balanța energetică la nivelul duzei rezultă:

$$P_{duza} = h_{duza} \cdot A_{contact_duza} \cdot (T_{duza} - T_{\infty}) + \varepsilon_{duza} \cdot \sigma_{duza} \cdot (T_{duza}^4 - T_{\infty}^4) \quad (6)$$

acesta fiind modelul complet cu convecție și radiație, pentru a estima temperatura reală a duzei.

- T_{∞} : Ambient temperature (outdoor), [K]
- ε : Surface emissivity (0-1), dimensionless (how efficiently the surface radiates compared to a black body), [-]
- σ : Stefan-Boltzmann constant, [W/m²·K⁴]
- $T_s^4 - T_{\infty}^4$: temperature difference to the fourth power (for thermal radiation), [K⁴].

This surface heat flux equation expresses the energy balance for a surface exposed to a heat source, in a combined heat transfer process: convection (to the environment) and radiation (surface emissivity).

It is used to determine the equilibrium temperature of a heated surface (e.g. 3D printed part, nozzle), to estimate the heat flux that must be managed by the system, and for thermal equilibrium calculations in processes assisted by hybrid sources (e.g. resistive + laser heating).

The term on the left of the equation (q'') represents the heat flux imposed on the surface (e.g. laser beam, resistive source). The term on the right of the equation represents the heat fluxes leaving the surface:

- $h \cdot (T_s - T_{\infty})$ is the heat lost by convection to the environment.
- $\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4)$ is the heat lost through radiation to ambient.

For the surface to reach a stable temperature T_s , the flux received must equal the flux given off.

The temperature in the depth of the material can be expressed with the relationship:

$$T(z) = T_s - \frac{q''}{k} \cdot z \quad (4)$$

where:

$T(z)$: temperature at depth z [K]

T_s : surface temperature [K]

q'' : heat flux [W/m²]

k : thermal conductivity [W/m·K]

z : depth in material [m].

This relationship shows the temperature distribution at depth, decreasing linearly with depth for the simplified model.

The power absorbed by the nozzle partially intersected with the laser beam is:

$$P_{duza} = q'' \cdot A_{contact_duza} \quad (5)$$

in which $A_{contact_duza}$ is the area where the laser beam touches the nozzle surface.

Performing the energy balance at the nozzle level results in:

$$P_{duza} = h_{duza} \cdot A_{contact_duza} \cdot (T_{duza} - T_{\infty}) + \varepsilon_{duza} \cdot \sigma_{duza} \cdot (T_{duza}^4 - T_{\infty}^4) \quad (6)$$

This is the complete model with convection and radiation to estimate the actual nozzle temperature.

Modelul tranzitoriu al temperaturii în creștere are forma:

$$T(z) = (T_{\infty} + \Delta T_{max}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7)$$

pentru $t \leq t_{exp}$ (unde t_{exp} este timpul de expunere) această relație descriind creșterea temperaturii într-un punct expus la radiația laser până la finalul expunerii.

În cazul răcirii, modelul tranzitoriu al temperaturii se poate exprima prin:

$$T(z) = (T_{\infty} + \Delta T_{max}) \cdot e^{-\frac{t-t_{exp}}{\tau}} \quad (8)$$

pentru $t > t_{exp}$, descriind scăderea temperaturii după oprirea expunerii la laser.

Ținând cont de proprietățile materialelor implicate (polimer PLA sau ABS sau altele pentru materialului depus și cupru-zinc aliaj sau realizat prin sinterizare de pulberi pentru duza de extrudare):

- PLA: conductivitate 0.13 W/mK, densitate 1240 kg/m³, capacitate calorică 1800 J/kgK, temperatură extrudare: 210°C
- Cupru-zinc: conductivitate 400 W/mK, emisivitate 0.9, temperaturi sigure de lucru până la 600°C.

Se pot efectua simulări numerice ale câmpului termic la nivelul suprafeței depunerii, dar și la nivelul duzei de extrudare, în zona care suferă încălziri datorită fasciculului laser.

2.3 Simularea numerică a modelului interacțiunii energetice pentru condiții statice de încălzire

Aplicând aparatul matematic pentru constantele de material precizate mai sus este posibilă determinarea temperaturilor unor puncte sau zone critice. Tabelul 1 prezintă toate rezultatele numerice obținute.

Se observă că există o situație definită de o anumită putere (1 W) și o anumită distanță dintre lentila dispozitivului laser și suprafața de depunere (25 mm) pentru care temperaturile calculate pentru modelul geometric solicitat termic sunt peste 340oC, ajungând chiar la peste 450oC. Astfel de temperaturi scot polimerul din starea fluid – vâscoasă introducându-l în starea de degradare termică, ceea ce nu este de dorit.

Pentru celelalte configurații ale sistemului hibrid studiate nivelul aportului caloric suplimentar, în vederea încălzirii hibride, nu prezintă pericole notabile pentru polimerul extrudat și depus.

The transient model of the rising temperature has the form:

$$T(z) = (T_{\infty} + \Delta T_{max}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7)$$

for $t \leq t_{exp}$ (where t_{exp} is the exposure time), this relationship describes the temperature increase at a point exposed to laser radiation until the end of the exposure.

In the case of cooling, the transient temperature model can be expressed by:

$$T(z) = (T_{\infty} + \Delta T_{max}) \cdot e^{-\frac{t-t_{exp}}{\tau}} \quad (8)$$

for $t > t_{exp}$, describing the temperature drop after stopping laser exposure.

Taking into account the properties of the materials involved (PLA or ABS polymer or others for the deposited material and copper-zinc alloy or made by sintering powders for the extrusion nozzle):

- PLA: conductivity 0.13 W/mK, density 1240 kg/m³, heat capacity 1800 J/kgK, extrusion temperature: 210°C
- Copper-zinc: conductivity 400 W/mK, emissivity 0.9, safe working temperatures up to 600°C.

Numerical simulations of the thermal field can be performed at the deposition surface level, but also at the extrusion nozzle level, in the area that undergoes heating due to the laser beam.

2.3 Numerical simulation of the energy interaction model for static heating conditions

By applying the mathematical apparatus for the material constants specified above, it is possible to determine the temperatures of critical points or zones. The table below (Table 1) presents all the numerical results obtained.

It is observed that there is a situation defined by a certain power (1 W) and a certain distance between the lens of the laser device and the deposition surface (25 mm) for which the temperatures calculated for the thermally stressed geometric model are above 340oC, reaching even above 450oC. Such temperatures remove the polymer from the fluid-viscous state, introducing it into the state of thermal degradation, which is not desirable.

For the other configurations of the hybrid system studied, the level of additional heat input, in view of hybrid heating, does not present notable dangers for the extruded and deposited polymer.

Tabelul 1. Fluxul termic și valorile temperaturilor pentru diverse reglări ale parametrilor sistemului hibrid
Table 1. Heat flux and temperatures for various adjustments of the hybrid system

Putere laser Laser power	Distanța lentilă-piesă Distance lens-piece	Diametru spot Spot diameter	Fluxul termic la suprafața piesei Heat flux on the surface of the deposited material	Putere laser absorbită de duza de extrudare Laser power absorbed by the extrusion nozzle	Putere totală preluată de duza de extrudare Total power absorbed by the extrusion nozzle	Temperatura la suprafața materialului depus Temperature of the deposited material surface	Temperatura la 0.5 mm sub suprafață Temperature at 0.5 mm below the surface	Temperatura duzei de extrudare Temperature of the extrusion nozzle
(W)	(mm)	(mm)	(W/m ²)	(mW)	(W)	(°C)	(°C)	(°C)
0.5	25	10.00	9003.16	36.01	0.056	322.60	287.97	241.41
0.5	30	12.00	6252.20	25.01	0.045	264.36	240.31	204.72
0.5	35	14.00	4593.45	18.37	0.038	220.76	203.09	181.25
1.0	25	10.00	18006.33	72.03	0.092	452.31	383.05	344.50
1.0	30	12.00	12504.39	50.02	0.070	381.02	332.93	284.38
1.0	35	14.00	9186.90	36.75	0.057	326.03	290.70	243.77

2.4 Simularea numerică a modelului interacțiunii energetice pentru condiții tranzitorii de încălzire

Aplicând calculul numeric pentru modelul de creștere tranzitorie- ecuația (7), în condițiile:

- $T_{\infty} = 298 \text{ K}$ (25°C).
- $\Delta T_{\max} = 200 \text{ K}$
- $\tau = 1 \text{ s}$.
- $t = 0.5 \text{ s}$
- exponentul: $e^{-\frac{0.5}{1}} \approx 0.6065$
- $1 - e^{-\frac{0.5}{1}} : 1 - 0.6065 \approx 0.3935$
- creșterea de temperatură: $200 \text{ K} \cdot 0.3935 \approx 78.7 \text{ K}$

rezultă că temperatura totală are valoarea:

$$T(0.5) = 298 \text{ K} + 78.7 \text{ K} = 376.7 \text{ K} \approx 103.7^{\circ}\text{C}$$

Așadar, după 0.5 s, temperatura este aproximativ 103.7°C .

2.4 Numerical simulation of the energy interaction model for transient heating conditions

Applying the numerical calculation for the transient growth model- equation (7), under the conditions:

- $T_{\infty} = 298 \text{ K}$ (25°C).
- $\Delta T_{\max} = 200 \text{ K}$
- $\tau = 1 \text{ s}$.
- $t = 0.5 \text{ s}$
- exponent: $e^{-\frac{0.5}{1}} \approx 0.6065$
- $1 - e^{-\frac{0.5}{1}} : 1 - 0.6065 \approx 0.3935$
- temperature increase: $200 \text{ K} \cdot 0.3935 \approx 78.7 \text{ K}$

it results that the total temperature is:

$$T(0.5) = 298 \text{ K} + 78.7 \text{ K} = 376.7 \text{ K} \approx 103.7^{\circ}\text{C}$$

So, after 0.5 s, the temperature is approximately 103.7°C .

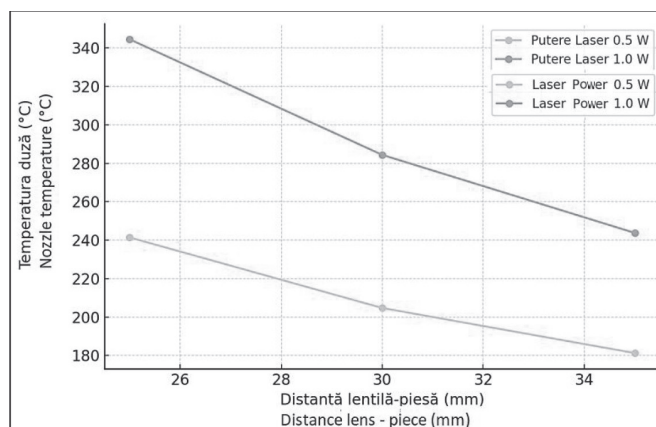


Figura 2. Graficul relației dintre temperatura duzei și distanța dintre lentila dispozitivului laser și piesă

Figure 2. Graph of the extrusion nozzle temperature against the distance between the lens of laser and the piece

Similar, la răcire, modelul în scădere tranzitorie – ecuația (8) - pentru un timp de expunere de 1 s (timpul cât acționează sursa de căldură) poate oferi informații cu privire la valoarea temperaturii la $t = 2 \text{ s}$:

- Temperatura inițială la finalul expunerii:
 $T_{\infty} + \Delta T_{\max} = 298 \text{ K} + 200 \text{ K} = 498 \text{ K}$ (9)
- exponentul: $e^{-\frac{2-1}{1}} \approx 0.3679$

temperatura finală devenind astfel:

$$T(2.0) = 498 \text{ K} \cdot 0.3679 \approx 183.2 \text{ K} \quad (10)$$

Similarly, during cooling, the transient decreasing model – equation (8) – for an exposure time of 1 s (the time the heat source is operating) can provide information regarding the temperature value at $t = 2 \text{ s}$:

- Initial temperature at the end of exposure:
 $T_{\infty} + \Delta T_{\max} = 298 \text{ K} + 200 \text{ K} = 498 \text{ K}$ (9)
- exponent: $e^{-\frac{2-1}{1}} \approx 0.3679$

the final temperature becoming as follows:

$$T(2.0) = 498 \text{ K} \cdot 0.3679 \approx 183.2 \text{ K} \quad (10)$$

Graficul arată evoluția temperaturii duzei în funcție de distanța lentilă-piesă, pentru ambele puteri laser. Se confirmă astfel scăderea temperaturii odată cu creșterea distanței și scăderea fluxului de energie.

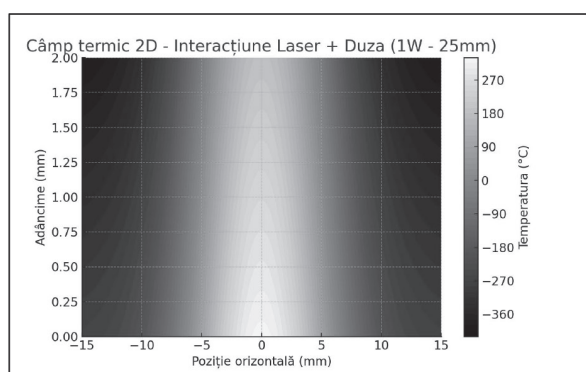
3. Simularea cu elemente finite (Finite element analysis - FEA) a interacțiunii dintre fasciculul laser și duza de extrudare

Simularea FEA prezentată în continuare arată distribuția câmpului termic generat de fasciculul laser combinat cu aportul de căldură de la duză.

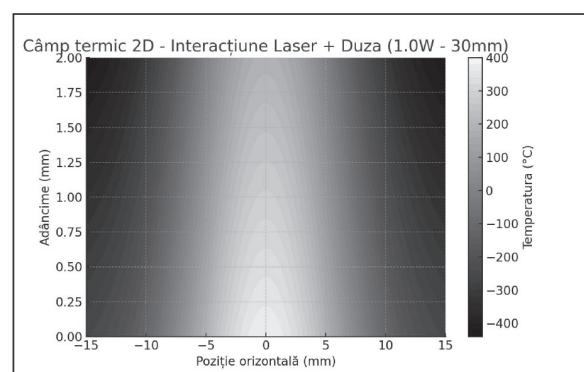
The graph shows the evolution of the nozzle temperature as a function of the lens-part distance, for both laser powers. It is thus confirmed that the temperature decreases with increasing distance and decreasing energy flux.

3. Finite element analysis (FEA) simulation of the interaction between the laser beam and the extrusion nozzle

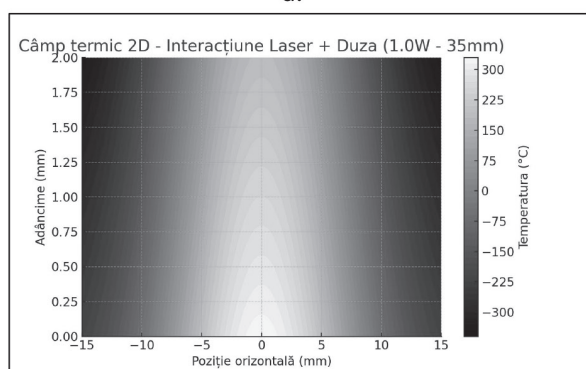
The FEA simulation presented below shows the distribution of the thermal field generated by the laser beam combined with the heat input from the nozzle.



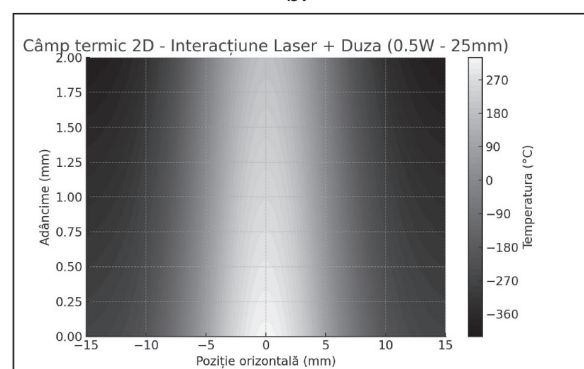
a.



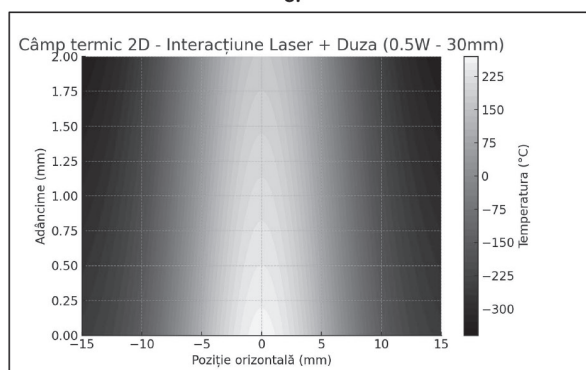
b.



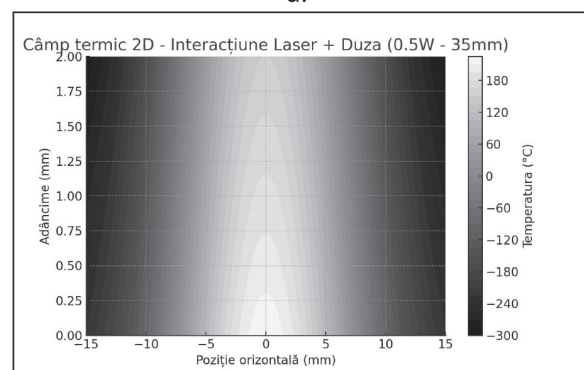
c.



d.



e.



f.

Figura 3. Simulare FEA a câmpului termic la suprafața duzei de extrudare
Figure 3. FEA simulation of the thermal field at the surface of the extrusion nozzle

Simularea FEA – putere fascicul 1.0 W – distanța lentilă- piesă 25/30/35 mm (fig.3.a/b/c): Zonele de

FEA simulation – beam power 1.0 W – lens-part distance 25/30/35 mm (fig.3.a/b/c): The high-temper-

temperatură ridicată se concentrează în centrul fasciculului, cu disipare progresivă de la axa suprafeței de încălzire către marginile acesteia. O distribuție similară se obține și în cazul unei puteri reduse cu 50%, temperaturile zonei încălzite scăzând procentual cu valori în intervalul 20-45%.

Comparând rezultatele, se observă că la 1.0 W și 25 mm distanță, sistemul atinge temperaturi aproximativ 400°C, temperaturi considerate periculoase pentru materialul PLA, în sensul ieșirii acestuia din starea fluid-vâscoasă și intrarea în zona de degradare termică. Deși poate mai puțin periculoasă pentru materialul duzei, totuși această temperatură poate produce local tensionări și deformări ale duzei.

Pe măsură ce creștem distanța la 30 și 35 mm, temperaturile scad, devenind mai controlabile. La 0.5 W, temperaturile sunt semnificativ mai mici, dar la distanță mare, fluxul poate fi insuficient pentru topirea adecvată a filamentului. Interacțiunea între laser și duză este clară: aportul laserului adaugă o cantitate semnificativă de energie, iar alegerea corectă a parametrilor este esențială pentru menținerea unui proces stabil și sigur.

În ceea ce privește comportamentul materialelor implicate, PLA, cu temperaturi de topire în vederea depunerii cuprinse între 180-220°C, este sensibil la supraîncălzire. La 1.0 W și distanță mică, temperaturile mari pot scoate materialul din starea fluid-vâscoasă și pot produce degradarea termică a acestuia.

Materialul cupru-zinc, deși bun conductor termic, poate suferi deteriorări ale formei și dimensiunilor dacă temperatura sa depășește 600°C.

Astfel, utilizarea unor distanțe mai mari și puteri moderate protejează ambele materiale și optimizează procesul.

4. Discuții și concluzii

Sursa laser introduce un flux termic suplimentar, care afectează temperatura locală a piesei și a duzei. Aceasta ajută la activarea suprafeței stratului anterior, facilitând fuziunea inter-strat și îmbunătățind aderența între straturi.

Duza de extrudare menține temperatura materialului în timpul depunerii, dar este influențată și de energia absorbită de la laser. Aceasta poate duce la supraîncălzire localizată sau perturbări în controlul temperaturii duzei.

Reducerea diametrului spotului laser (ex.: de la 15 mm la 5 mm) concentrează mai multă energie pe unitatea de suprafață, ceea ce duce la o încălzire mai

atură zonele sunt concentrate în centrul fasciculului, cu disipare progresivă de la axa suprafeței de încălzire către marginile acesteia. A similar distribution is obtained in the case of a power reduced by 50%, the temperatures of the heated area decreasing in percentage with values in the range of 20-45%.

Comparing the results, it is observed that at 1.0 W and 25 mm distance, the system reaches temperatures of approximately 400°C, temperatures considered dangerous for the PLA material, in the sense of its exit from the fluid-viscous state and entry into the thermal degradation zone. Although perhaps less dangerous for the nozzle material, this temperature can still produce local stresses and deformations of the nozzle. As we increase the distance to 30 and 35 mm, the temperatures decrease, becoming more controllable. At 0.5 W, the temperatures are significantly lower, but at a large distance, the flux may be insufficient for adequate melting of the filament. The interaction between the laser and the nozzle is clear: the laser input adds a significant amount of energy, and the correct choice of parameters is essential for maintaining a stable and safe process.

Regarding the behaviour of the materials involved, PLA, with melting temperatures for deposition between 180-220°C, is sensitive to overheating. At 1.0 W and a short distance, high temperatures can remove the material from the fluid-viscous state and cause its thermal degradation.

The copper-zinc material, although a good thermal conductor, can suffer damage to its shape and dimensions if its temperature exceeds 600°C.

Thus, the use of larger distances and moderate powers protects both materials and optimizes the process.

4. Discussions and conclusions

The laser source introduces an additional thermal flux, which affects the local temperature of the part and the nozzle. This helps to activate the surface of the previous layer, facilitating inter-layer fusion and improving inter-layer adhesion.

The extrusion nozzle maintains the temperature of the material during deposition, but is also influenced by the energy absorbed from the laser. This can lead to localized overheating or disruptions in nozzle temperature control.

Reducing the laser spot diameter (e.g. from 15 mm to 5 mm) concentrates more energy per unit area, which leads to faster heating and sudden tempera-

rapidă și creșteri bruște ale temperaturii, precum și la apariția unui risc de degradare termică a materialului (mai ales pentru materialul PLA).

Interacțiunea dintre laser și duză poate genera un gradient termic complex, unde temperatura variază între zona de depunere și suprafața expusă la laser.

Pentru anumite distanțe focalizare/defocalizare, energia termică acumulată în piesă poate duce la deformări termice sau contracții inegale, mai ales la materiale cu conductivitate termică redusă.

Este necesară asigurarea unui echilibru între puterea laserului și temperatura duzei pentru a se putea controla dimensiunile stratului depus, evitând dilatarea necontrolată a materialului.

Dacă puterea laserului este prea mare sau dacă suprafața iluminată este prea mică, duza poate absorbi o cantitate semnificativă de energie, ceea ce poate duce la o încălzire excesivă a duzei și la perturbarea controlului automat al temperaturii. În paralel, pot apărea unele variații necontrolate ale vitezei de răcire și depunere a filamentului.

În cazul utilizării unei surse laser de putere mai mare ar putea fi necesar un sistem de disipare termică pentru duză, cu aer sau cu apă.

ture increases, as well as a risk of thermal degradation of the material (especially for PLA material).

The interaction between the laser and the nozzle can generate a complex thermal gradient, where the temperature varies between the deposition zone and the surface exposed to the laser.

For certain focus/defocus distances, the thermal energy accumulated in the part can lead to thermal deformations or uneven contractions, especially in materials with low thermal conductivity.

It is necessary to ensure a balance between the laser power and the nozzle temperature, in order to control the dimensions of the deposited layer, avoiding uncontrolled expansion of the material.

If the laser power is too high or the illuminated area is too small, the nozzle can absorb a significant amount of energy, which can lead to excessive heating of the nozzle and disruption of automatic temperature control. At the same time, uncontrolled variations in the cooling and deposition rate of the filament may occur.

When using a higher-power laser source, a heat dissipation system for the nozzle, with air or water, may be required.

Bibliografie/References

- [1] N. Shahrubudin, T. C. Lee, R. Ramlan (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, *Procedia Manufacturing*, 35, pp. 1286-1296, , <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- [2] R. Kumaresan, et.al (2022). Fused deposition modelling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 120. 10.1007/s00170-022-08860-7.
- [3] S. Raja, et.al (2024). Minimizing environmental footprint in FDM additive manufacturing: Analysing process efficiency through advanced optimization techniques. *Applied Chemical Engineering*. 7. 10.59429/ace.v7i4.5533
- [4] Yue, W., Zhang, Y., Zheng, Z., & Lai, Y. (2024). Hybrid Laser Additive Manufacturing of Metals: A Review. *Coatings*, 14(3), 315. <https://doi.org/10.3390/coatings14030315>
- [5] R. Socol, et.al. (2022). Conditioning the structure of deposited layers by hybrid thermal source in FFF 3D printing. *The Romanian Journal of Technical Sciences. Applied Mechanics*, Vol. 67 No. 3: International Conference on Advanced Research in Engineering, CARE 2022
- [6] R. Socol, I. Stefan, A-A. Midan, Resistive-hot air hybrid heat source for additive manufacturing, *SUDURA Journal* nr.3/2024, 32-42

Pentru citare:

R. Socol, I.D. Savu, I. Stefan, S.V. Savu, C. Chihai (2025) *Thermal field analysis in Fused Filament Fabrication printing process using hybrid heating laser-resistive*, *Sudura*, nr. 1, pp. 4-14, <https://doi.org/10.70652/sud.2025.1.1>



NEWSLETTER

Buletin informativ editat de Asociația de Sudură din România



Nu uitați!

Informații noi despre activitățile ASR sunt prezentate lunar în **ASR Newsletter**, accesibil pe **www.asr.ro**