

## Sursă termică hibridă rezistiv – aer cald pentru fabricația aditivă

## Resistive – hot air hybrid heat source for additive manufacturing

Remus Socol<sup>1</sup>, Iulian Ștefan<sup>1</sup>, Andrei-Angelo Midan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitatea din Craiova, PhD student

<sup>2</sup> Universitatea din Craiova

### Rezumat

Sursele termice hibride sunt utilizate în diverse procese pentru a se îmbunătăți procesul de încălzire și pentru a se diminua dezavantajele specifice unei încălziri tradiționale specifice unui proces tehnologic anume. Lucrarea prezintă principalele elemente care au compus procesul complex de concepție, realizare și verificare a unei surse termice hibride utilizate la imprimarea 3D prin procedeul Fabricație cu Filament Topit (FFF). Sursa hibridă elaborată a constat din alăturarea sinergică la sursa tradițională rezistivă a unei a doua surse, un jet de aer cald cu debitul și temperatura controlabile. În cazul celei de-a doua componente termice au fost verificate trei soluții constructive, a fost calculat circuitul pneumatic pentru o curgere neturbulentă și au fost efectuate simulări și verificări ale câmpului termic la nivelul piesei imprimate, utilizând sursa hibridă. S-a constatat faptul că aerul cald se poate constitui într-o sursă termică utilizabilă la imprimarea 3D, aducând o serie de avantaje, dar și dezavantaje noului sistem de fabricație aditivă creat. Principalul avantaj este legat de structura mai compactă rezultată ca urmare a aplatizării depunerii materialului, acest fenomen având loc datorită menținerii în starea fluid-vâscoasă pentru mai mult timp a polimerului depus. Principalele dezavantaje sunt legate de complexitatea noii instalații și de costurile energetice specifice celei de-a doua surse.

### Cuvinte cheie

Sursă termică hibridă, procedeu FFF, soluții constructive, modelare și simulare câmp termic, măsurare temperaturi

### Abstract

Hybrid heat sources are used in various processes to improve the heating process and to reduce the specific disadvantages of traditional heating specific to a particular technological process. The paper presents the main elements that compose the complex process of conception, realization, and verification of a hybrid thermal source used in 3D printing through the Fused Filament Fabrication (FFF) process. The developed hybrid source consisted of the synergistic addition to the traditional resistive source of a second source, a hot air jet with controllable flow and temperature. In the case of the second thermal component, three constructive solutions were verified, the pneumatic circuit was calculated for a non-turbulent flow, and simulations and verifications of the thermal field at the level of the printed part were performed, using the hybrid source. It was found that hot air can be used as a heat source for 3D printing, bringing several advantages, but also disadvantages to the new additive manufacturing system created. The main advantage is related to the more compact structure resulting from the flattening of the material deposition, this phenomenon occurs due to maintaining the fluid-viscous state for a longer time of the deposited polymer. The main disadvantages are related to the new installation's complexity and the second source's specific energy costs.

### Keywords

Hybrid heat source, FFF process, structural design, modelling and simulation of thermal field, temperature measurements

## 1. Introducere

În principiu, un „sistem hibrid” constă într-un ansamblu integrat a două sau mai multe sisteme separate care combinate formează un întreg ale cărui efecte sunt superioare efectelor celor două subsisteme luate

## 1. Introduction

In principle, a “hybrid system” consists of an integrated assembly of two or more separate systems that combined form a whole whose effects are superior to the effects of the two subsystems taken

separat, iar conceptul de „sistem hibrid” este unul modern, aplicabil în diverse domenii, cum ar fi ingineria, economia, tehnologia informației și biologie. Cu toate acestea, dacă ne referim la ideea de combinare a două sau mai multe sisteme sau tehnologii pentru a crea un sistem îmbunătățit sau mai eficient, atunci originea acestui concept poate fi urmărită în mai multe domenii și momente temporale.

Primele exemple de sisteme hibride apar în agricultură, unde cultivarea plantelor hibride (obținute prin încrucișarea a două varietăți diferite pentru a produce o plantă cu trăsături dorite) a fost introdusă de cercetători agricoli. Un exemplu istoric notabil este dezvoltarea porumbului hibrid la începutul secolului al XX-lea, promovat de oameni de știință precum George Shull și Edward East în Statele Unite [1]. Opțiunea pentru sistemele hibride este în creștere, în special în zona de energie electrică și termică, datorită anumitor avantaje pe care utilizatorii le identifică în funcționarea acestora [2]. În capitolul 6 „Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing” al Quadrennial Technology Review (QTR) din 2015, Departamentul pentru Mediu al Statelor Unite identifică mai multe tipuri de surse termice hibride, unele pentru încălzirea ambientală, altele pentru distilare sau pentru distrugere de deșeuri [3]. Încălzirea mediului ambiant la nivelul unor incinte rezidențiale sau de lucru se poate face cu sisteme hibride pentru a crește eficiența fluxului de căldură dinspre sursă către utilizator.

Pot exista combinații de surse rezistive combinate cu apă caldă, jet de aer cald combinat cu apă caldă, jet de aer cald combinat cu rezistiv etc. Un exemplu în acest sens este pompa de căldură hibridă, dispozitiv care se referă la un sistem ce utilizează o pompă de căldură standard alături de o altă sursă de căldură, de obicei un boiler pe combustibili fosili (gaz, petrol sau GPL) [4]. Utilizarea sistemelor hibride de propulsie la autovehicule cunoaște astăzi o cerere în creștere continuă și accelerată, datorită managerului de putere care asigură variațiile de putere necesare în funcționarea vehiculului, la viteză mare și la consum redus [5]. Propulsia pur electrică are ca principal dezavantaj o autonomie redusă, în timp ce propulsia termică este recunoscută ca fiind mare consumator și mare poluator [6]. Aceste dezavantaje dispar în cazul propulsiei hibride, păstrând sau chiar măbind performanțele tehnice ale vehiculului.

În ceea ce privește procesele tehnologice de prelucrare a materialelor, cele mai cunoscute sisteme hibride sunt sursele termice hibride compuse din două

separat, and the concept of “hybrid system” is a modern, applicable in various fields such as engineering, economics, information technology and biology. However, if we refer to the idea of combining two or more systems or technologies to create an improved or more efficient system, then the origin of this concept may be followed in several domains and time points.

The first examples of hybrid systems appear in agriculture, where the cultivation of hybrid plants (obtained by crossing two different varieties to produce a plant with desired traits) was introduced by agricultural researchers. A notable historical example is the development of hybrid maize in the early 20th century, promoted by scientists such as George Shull and Edward East in the United States [1].

The option for hybrid systems is growing, especially in the area of electricity and heat, due to certain advantages that users identify in their operation [2]. In Chapter 6 “Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing” of the 2015 Quadrennial Technology Review (QTR), the United States Department of the Environment identifies several types of hybrid heat sources, some for ambient heating, others for distillation or waste destruction [3]. The heating of the ambient environment at the level of residential or work premises can be done with hybrid systems to increase the efficiency of heat flow from the source to the user.

There can be combinations of resistive combined with hot water sources, hot air jet combined with hot water, hot air jet combined with resistive etc.

An example of this is the hybrid heat pump, a device that refers to a system that uses a standard heat pump alongside another heat source, usually a fossil fuel boiler (gas, oil or LPG) [4].

The use of hybrid propulsion systems in automobiles today has a continuously growing and accelerating demand, thanks to the power manager that ensures the power variations required in the operation of the vehicle, at high speed and with low consumption [5]. Pure electric propulsion has as its main disadvantage a reduced autonomy, while thermal propulsion is recognized as high consumption and high polluter [6]. These disadvantages disappear in the case of hybrid propulsion, preserving or even increasing the technical performance of the vehicle.

Regarding the technological processes of material processing, the most well-known hybrid systems are hybrid thermal sources composed of two or more sources, the operation of which means the

sau mai multe surse, a căror funcționare înseamnă cumulara avantajelor fiecărei surse luate separat și reducerea efectelor dezavantajelor fiecărei surse luate separat [7,8]. Prin realizarea acestor sisteme hibride încălzire se urmărește o omogenizare a modului de încălzire, o omogenizare a temperaturilor la nivelul unei piese, precum și o distribuție omogenă a caracteristicilor mecanice sau de alte naturi la nivelul produsului încălzit. De asemenea se urmărește o reducere a toleranțelor în ceea ce privește temperatura atinsă de material, dar și crearea posibilității de a realiza facil trepte de încălzire și răcire sau cicluri diverse controlabile în detaliu. Întâlnim astfel de surse de căldură hibride în procesele de sudare și lipire [7,8], de tratament termic, precum și în sistemele de prelucrare cu microunde [9,10] sau în cele de prelucrare cu plasmă [11,12].

Prima sursă termică hibridă pentru prelucrarea materialelor, care combină diferite metode de încălzire pentru a îmbunătăți eficiența și calitatea procesului de prelucrare, a fost introdusă în domeniul sudării [13,14]. William Steen este cel creditat cu dezvoltarea, în anul 1979, a primului sistem de sudare cu sursă hibridă de încălzire [14]. Acest sistem este cel mai cunoscut sistem pentru prelucrarea materialelor, sursa hibridă fiind formată dintr-un fascicul laser (care asigură pătrunderea dorită și o zonă influențată termic mai redusă) și un arc electric tradițional (pentru flexibilitate în poziționare și control al procesului). Cele două, funcționând sinergic, contribuie la o calitate îmbunătățită a sudurii și la o productivitate mai mare a procesului de sudare. Acest tip de sursă hibridă pentru sudare a fost aplicată cu succes în industrie precum construcția de nave [15], industria feroviară [16], dar și în încărcare [17] sau fabricație aditivă a unor componente metalice sau polimerice complexe [18-21], unde precizia și durabilitatea sunt esențiale.

Dezavantajele sistemelor hibride sunt legate de complexitatea acestor sisteme, complexitate care atrage implicit și costuri de structurare relativ mari, de dificultatea și costurile de implementare, dar și de consumurile energetice crescute comparativ cu sursele termice tradiționale [13-18].

Cu alte cuvinte, sistemele hibride și-au făcut loc în multe domenii ale ingineriei, iar limitarea aplicării lor ține numai de limitele inventivității specialiștilor. Așa cum se preciza mai sus, și în domeniul fabricației aditive au fost încercări de introducere a sistemelor hibride, uneori cu succes, alteori anumite limitări i-au făcut pe cercetători să abandoneze această idee.

accumulation of the advantages of each source taken separately and the reduction of the effects of the disadvantages of each source taken separately [7,8]. By creating these hybrid heating systems, a homogenization of the heating method, a homogenization of temperatures at the level of a part, as well as a homogeneous distribution of mechanical or other characteristics at the level of the heated product is aimed at. It also aims to reduce the tolerances in terms of the temperature reached by the material, but also to create the possibility to easily realize heating and cooling steps or various cycles that can be controlled in detail.

We meet such hybrid heat sources in welding and soldering processes [7,8], heat treatment, as well as in microwave processing systems [9,10] or plasma processing [11,12].

The first hybrid heat source for material processing, which combines different heating methods to improve the efficiency and quality of the processing process, was introduced in the field of welding [13,14]. William Stein is credited with developing, in 1979, the first welding system with a hybrid heating source [14]. This system is the most well-known system for processing materials, the hybrid source being formed by a laser beam (providing the desired penetration and a reduced heat-affected zone) and a traditional electric arc (for flexibility in positioning and process control). The two, working synergistically, contribute to improved weld quality and higher productivity of the welding process. This type of hybrid welding source has been successfully applied in industries such as shipbuilding [15], the railway industry [16], but also in loading [17] or additive manufacturing of complex metallic or polymeric components [18-21], where precision and durability are essential.

The disadvantages of hybrid systems are related to the complexity of these systems, the complexity that implicitly attracts relatively high structuring costs, the difficulty and costs of implementation, but also the increased energy consumption compared to traditional thermal sources [13-18].

In other words, hybrid systems have made their way into many areas of engineering, and the limitation of their application lies only with the limits of the inventiveness of specialists. As stated above, also in the field of additive manufacturing there have been attempts to introduce hybrid systems, sometimes successfully, and other times certain limitations have made researchers abandon this idea.

În continuare se vor prezenta rezultatele unor cercetări efectuate cu scopul de a crea surse termice hibride pentru fabricația aditivă prin procedeul FFF.

## 2. Soluțiile constructive propuse

### 2.1 Principiile tranziției spre o sursă hibridă

Trecerea de la sursa rezistivă, tradițională, la o sursă hibridă atrage după sine o serie de modificări ale procesului de depunere. Din acest motiv, această tranziție trebuie să se deruleze respectând anumite principii care s-au formulat de către autori în baza observațiilor efectuate în cadrul unor încercări experimentale preliminare.

Privind strict din perspectiva procesului de extrudare, se poate considera că sursa rezistivă a unei imprimante FFF funcționează punctual, direct la nivelul duzei de extrudare. În schimb, a doua sursă termică, adăugată pentru a structura sistemul hibrid, nu poate acționa punctual. O astfel de acțiune punctuală ar putea fi localizată fie pe duza de extrudare, fie în zona de depunere. În primul caz, sursa suplimentară ar altera fluiditatea polimerului la ieșirea din duză, perturbând procesul de depunere. În al doilea caz, o acțiune punctuală asupra suprafeței depuse ar fi inefficientă, deoarece ar necesita o încălzire instantanee, sincronizată cu depunerea polimerului, pentru a încălzi în mod adecvat noile straturi extrudate.

Astfel, sursa suplimentară trebuie să acționeze la nivel de suprafață, nu punctual.

Dacă sursa suplimentară provoacă fie o creștere a temperaturii duzei de extrudare, fie o încălzire volumică intensă a sistemului de extrudare, aceasta va destabiliza procesul de depunere. Creșterea temperaturii duzei de extrudare peste nivelul optim poate duce la degradarea termică a polimerului sau, cel puțin, la deteriorarea proprietăților fizice și mecanice ale acestuia. Dacă fluxul termic la nivelul duzei este prea intens, materialul topit va deveni excesiv de fluid, compromițând controlul asupra depunerii. Din aceste motive, sistemul hibrid trebuie să mențină regimul de încălzire al duzei neschimbat. Depășirea temperaturii optime de extrudare va modifica atât parametrii depunerii, cât și caracteristicile polimerului depus.

Orice alterare a procesului de extrudare cauzată de sistemul hibrid va necesita ajustări ale parametrilor cinematici ai deplasării capului de extrudare. Pentru a minimiza impactul asupra sistemului cinematic, sursa suplimentară nu trebuie să influențeze procesul de extrudare a polimerului.

In the following, the results of research carried out intending to create hybrid heat sources for additive manufacturing through the FFF process will be presented.

## 2. Proposed design

### 2.1 Principles of transition to hybrid heating

The transition from the traditional resistive source to a hybrid source entails a number of changes in the deposition process. For this reason, this transition must take place respecting certain principles that we have formulated based on the observations made in preliminary experimental trials.

Looking strictly from the perspective of the extrusion process, the resistive source of an FFF printer can be considered to operate pointwise, directly at the level of the extrusion nozzle. In contrast, the second heat source, added to structure the hybrid system, cannot act punctually. Such point action could be located either on the extrusion nozzle or in the deposition area. In the first case, the additional source would alter the fluidity of the polymer at the nozzle exit, disrupting the deposition process. In the second case, a spot action on the deposited surface would be ineffective, as it would require instantaneous heating, synchronized with the deposition of the polymer, to adequately heat the newly extruded layers.

Thus, the additional source must act at surface level, not pointwise.

If the additional source causes either an increase in the temperature of the extrusion nozzle or an intense volume heating of the extrusion system, it will destabilize the deposition process. Increasing the temperature of the extrusion nozzle above the optimum level can lead to thermal degradation of the polymer or, at least, deterioration of its physical and mechanical properties. If the heat flux at the nozzle is too intense, the melt will become excessively fluid, compromising deposition control. For these reasons, the hybrid system must maintain the nozzle heating regime unchanged. Exceeding the optimum extrusion temperature will change both the deposition parameters and the characteristics of the deposited polymer.

Any alteration of the extrusion process caused by the hybrid system will require adjustments to the kinematic parameters of the displacement of the extrusion head. To minimize the impact on the kinematic system, the additional source must not influence the polymer extrusion process.

Un sistem hibrid cu o sursă care acționează la nivel de suprafață poate încălzi suplimentar platforma de imprimare. Aceasta din urmă are un sistem propriu de reglare automată a temperaturii, însă o cantitate excesivă de căldură de la sursa suplimentară poate compromite funcționarea acestui sistem. Prin urmare, la integrarea sursei suplimentare în sistemul hibrid, trebuie evitată afectarea funcționării sistemului de reglare termică al platformei.

Adăugarea unei surse suplimentare care urmărește zona de depunere trebuie să țină cont de parametrii cinematici ai sistemului de deplasare a capului de extrudare. Montarea sursei termice suplimentare pe sistemul de deplasare va modifica acești parametri din cauza masei adăugate, ceea ce poate duce la o funcționare necontrolabilă a imprimantei. În plus, dimensiunile suplimentare pot restricționa spațiul de mișcare al capului de extrudare.

## 2.2 Sursa termică suplimentară propusă

De-a lungul timpului au fost dezvoltate diverse tipuri de surse termice, unele cu aplicabilitate generală, altele cu dedicație pentru anumite procese. Pentru cercetările prezentate în această lucrare s-a ales ca sursă termică suplimentară jetul de aer cald.

O astfel de sursă termică, oarecum dificil de controlat cu precizie, este o sursă utilizată cu succes în procesele de lipire prin retopire industriale. Este o sursă termică simplă de realizat, costurile implicate fiind relativ mici.

Pentru introducerea acestei surse termice suplimentare s-au proiectat și verificat trei variante constructive (figura 1).

A hybrid system with a surface-acting source can additionally heat the print bed. The latter has its own system of automatic temperature regulation, but an excessive amount of heat from the additional source can compromise the operation of this system. Therefore, when integrating the additional source into the hybrid system, it must be avoided to affect the operation of the thermal regulation system of the platform.

The addition of an additional source tracking the deposition zone must take into account the kinematic parameters of the extrusion head displacement system. Mounting the additional heat source on the travel system will change these parameters due to the added mass, which may result in uncontrollable printer operation. In addition, the modifications of the actual dimensions can restrict the movement space of the extrusion head.

## 2.2 Proposed additional power source

Over time, various types of heat sources have been developed, some with general applicability and others tailored to specific processes. For the research presented in this paper, a hot air jet was selected as an additional thermal source.

Although this type of heat source can be somewhat challenging to control precisely, it is widely and successfully used in industrial reflow soldering processes. It is also a relatively simple and cost-effective option to implement.

Three distinct constructive variants were designed and verified for the application of this additional heat source (figure 1).



**Figura 1.** Variantele de surse termice suplimentare propuse: a) Jet de aer cald fără controlarea suprafeței de acțiune; b) Jet de aer cald cu un control minim al suprafeței de acțiune; c) Jet de aer cald cu control ridicat al suprafeței de acțiune

**Figure 1.** Variants of proposed additional thermal sources: a) Hot-air jet without controlling the activated surface; b) Hot-air jet with low control of the activated surface; c) Hot-air jet with high control of the activated surface

În fiecare dintre cele trei variante sursa de aer cald a fost un dispozitiv rezistiv (funcționând în baza efectului Joule-Lenz) care încălzește aerul pus în mișcare de către un ventilator, dispozitiv destinat sistemelor de sudare cu

In each of the three variants, the source of hot air was a resistive device (operating based on the Joule-Lenz effect) that heats the air set in motion by a fan, a device intended for hot air welding systems of pol-

aer cald a polimerilor. Circuitul pneumatic a trecut prin mai multe faze de proiectare, de la simpla transmitere a jetului de aer cald prin atmosferă, până la aducerea jetului de aer la capătul duzei și orientarea lui pe piesă.

Calculul circuitului s-a făcut în baza menținerii unei curgeri laminare în condițiile utilizării unor pereți gofrați ai tubului de ghidare, gofrajul permițând modelarea facilă a circuitului.

Curgerea laminară presupune încadrarea numărului Reynolds sub valoarea de 2300:

$$Re = \frac{v_{med} \cdot D}{\nu} < 2300 \quad (1)$$

Vâscozitatea cinematică  $\nu$  este definită cu ajutorul vâscozității dinamice de relația:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

unde:

$\nu$  - vâscozitatea cinematică [ $m^2/s$ ]

$\eta$  - vâscozitatea dinamică [ $kg/m \cdot s$  sau poise]:  $\eta = A \cdot T^n$ , unde  $A$  și  $n$  sunt constante ale fluidului (aerului), iar  $T$  este temperatura momentană

$\rho$  - densitatea fluidului [ $kg/m^3$ ].

Cum diametrul tubului de ghidare a fost de 35 mm s-a obținut o viteză necesară pentru menținerea curgerii laminare de 1,17 m/s.

S-a considerat faptul că pierderile de sarcină prin tubul de ghidare sunt raportabile la energia cinetică a fluidului aflat în mișcare:

$$P_s = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

unde:

$P_s$  - pierderile de sarcină

$k$  - coeficient de rezistență

$v$  - viteza fluidului

$g$  - accelerația gravitațională.

Conform H.P.G. Darcy, forma fundamentală a pierderilor liniare este:

$$P_{sl} = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

unde:

$P_{sl}$  - pierderile de sarcină liniare

$\lambda$  - coeficientul pierderilor liniare de sarcină

$l$  - lungimea tubului de ghidare

$D$  - diametrul tubului de ghidare

$v$  - viteza fluidului

$g$  - accelerația gravitațională

În urma calculelor efectuate rugozitatea echivalentă pentru tubul gofrat de suflare de aer cald este:  $\Delta = 2,817$  mm. Se poate concluziona că aceasta valoare de pierderi de sarcină reprezintă valoarea maximă pe care tubul gofrat de suflare de aer cald trebuie să o aibă.

ymers. The pneumatic circuit went through several phases of design, from simply passing the jet of hot air through the atmosphere, to bringing the jet of air to the end of the nozzle and directing it onto the part. The calculation of the circuit was made on the basis of maintaining a laminar flow under the conditions of using embossed walls of the guide tube, the embossing allowing easy modelling of the circuit.

Laminar flow requires the Reynolds number to be below 2300:

$$Re = \frac{v_{med} \cdot D}{\nu} < 2300 \quad (1)$$

The kinematic viscosity  $\nu$  is defined using the dynamic viscosity by the relation:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

where:

$\nu$  - kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]

$\eta$  - dynamic viscosity [ $kg/m \cdot s$  or poise]:  $\eta = A \cdot T^n$ , where  $A$  and  $n$  are constants of the fluid (air), and  $T$  is the instantaneous temperature

$\rho$  - fluid density [ $kg/m^3$ ].

As the diameter of the guide tube was 35 mm, a velocity necessary to maintain laminar flow of 1.17 m/s was obtained.

It was considered that the pressure losses within the guiding tube are related to the kinetic energy of the fluid in motion:

$$P_s = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

where:

$P_s$  - pressure losses

$k$  - resistance coefficient

$v$  - velocity of the fluid

$g$  - gravitational acceleration.

According to H.P.G. Darcy, the fundamental form of linear losses is:

$$P_{sl} = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

where:

$P_{sl}$  - linear pressure losses

$\lambda$  - coefficient of linear load losses

$l$  - the length of the guiding tube

$D$  - the diameter of the guiding tube

$v$  - velocity of the fluid

$g$  - gravitational acceleration

Following the calculations, the equivalent roughness for the hot air-blowing corrugated tube is  $\Delta = 2.817$  mm. It can be concluded that this pressure loss value represents the maximum value that the hot air-blowing corrugated tube must have.

**Tabel 1.** Viteza măsurată a jetului de aer  
**Table 1.** Measured hot-air jet speed

Treaptă viteză jet de aer cald	Valoare viteză jet de aer în varianta 1 (m/s)	Valoare viteză jet de aer în varianta 2 (m/s)	Valoare viteză jet de aer în varianta 3 (m/s)
1	2,0 - 2,1	0,8 - 0,9	1,5 - 1,6
2	2,8 - 2,9	1,1 - 1,2	2,5 - 2,6
3	3,1 - 3,2	1,2 - 1,3	2,6 - 2,7
4	3,5 - 3,6	1,3 - 1,4	3,7 - 3,8
5	3,9 - 4,0	1,5 - 1,6	4,3 - 4,4



**Figura 2.** Anemometru utilizat la măsurarea vitezei  
**Figure 2.** Anemometer used for measurement of speed

### 3. Program experimental

#### 3.1 Materiale utilizate la depunere

Pentru experimentările de depunere prin procedeul FFF s-a utilizat un filament din Acid Polilactic (PLA). PLA este un poliester termoplastic provenind din amidon de porumb, rădăcini de tapioca sau trestie de zahăr. Deși se degradează relativ repede (max 2 ani) când este expus la radiația ultravioletă a Soarelui, este, totuși, considerat a fi un polimer cu o rezistență mecanică relativ bună pentru aplicații cu solicitare mecanică medie. Se comportă bine la imprimarea 3D și poate fi colorat. Dezavantajul lui este un comportament slab la temperaturi ridicate și la solicitări mecanice de valori mari.

În experimentări s-a utilizat un filament din PLA comercial, având diametrul de 1,75 mm.

#### 3.2 Parametrii procesului de imprimare FFF

Pornind de la natura materialului filamentului, ABS, s-au stabilit valorile parametrilor de imprimare prin procedeul FFF (tabelul 2).

**Tabel 2.** Parametrii procesului de depunere FFF  
**Table 2.** Parameters of FFF process

Parametru Parameter	Valoare Value	Parametru Parameter	Valoare Value
Înălțimea stratului	0.1 mm	Materialul filamentului	PLA
Unghiul de depunere	0°	Diametrul filamentului	1,75 mm
Densitate de umplere	50%	Temperatură duză de extrudare	215°C
Model de umplere	Grilă	Temperatură pat depunere	60°C
Unghiul rasterului	45°	Viteza de imprimare	50 mm/s
Diametrul duzei	0.4 mm	Temperatura ambiantă	23 °C

#### 3.3 Probele imprimate

Proba imprimată a fost o clemă de fixare a unor elemente de circuit electric, funcționând în condiții de solicitare la compresiune (figura 3.a).

#### 3.4 Examinarea vizuală

Probele imprimate au fost examinate vizual pentru a se identifica eventualele schimbări ale formei secțiunii filamentului depus. Examinarea s-a realizat în condițiile SR EN 13100-1:2017 Examinări nedis-

### 3. Experimental design

#### 3.1 Materials used in printing

A Polylactic Acid (PLA) filament was used for the FFF deposition experiments.

PLA is a thermoplastic polyester derived from corn starch, tapioca roots, or sugar cane. Although it degrades relatively quickly (max 2 years) when exposed to ultraviolet radiation from the Sun, it is nevertheless considered to be a polymer with relatively good mechanical strength for applications with medium mechanical stress. It performs well in 3D printing and can be coloured. Its disadvantage is poor behaviour at high temperatures and high mechanical stress.

A commercial PLA filament with a diameter of 1.75 mm was used in the experiments.

#### 3.2 Parameters of the FFF printing process

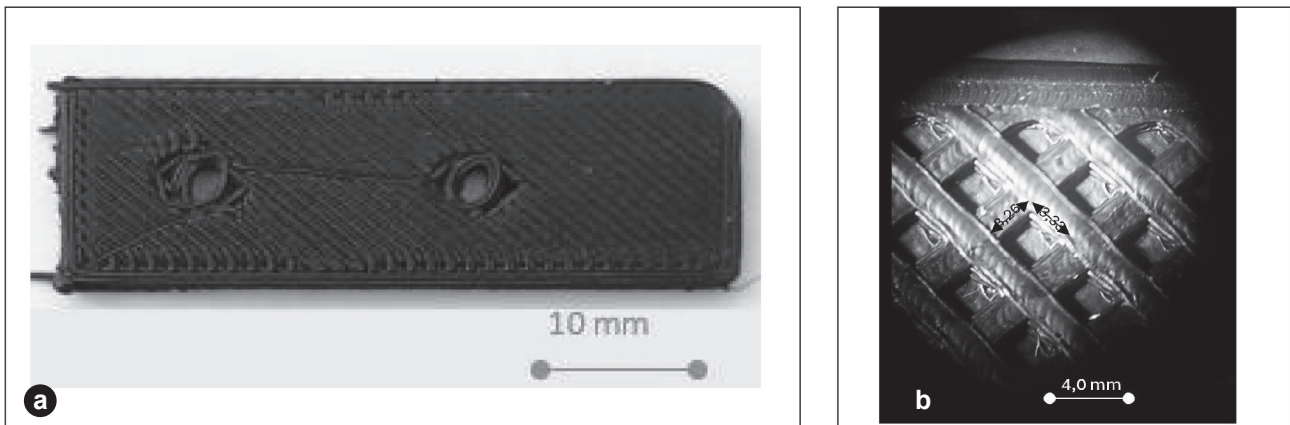
Starting from the nature of the filament material, PLA, the values of the FFF printing parameters were established (table 2).

#### 3.3 Printed specimens

The printed sample was a clamp for fixing some electrical circuit elements, operating under compression stress conditions (figure 3.a).

#### 3.4 Visual testing

The printed samples were visually examined to identify any changes in the shape of the deposited filament section. The examination was carried out under SR EN 13100-1:2017 Non-destructive exami-



**Figura 3.** Exemplu de probă imprimată (a.) și imagine mărită a acesteia din timpul examinării vizuale (b.)  
**Figure 3.** Example of a printed sample (a.) and enlarged image of it during visual examination (b.)

tructive ale îmbinărilor sudate ale semifabricatelor din materiale termoplastice. Partea 1: Examinare vizuală, utilizând un stereomicroscop.

În figura 3.b este prezentată imaginea unei zone de suprafață examinate vizual.

### 3.5 Încercarea la compresiune

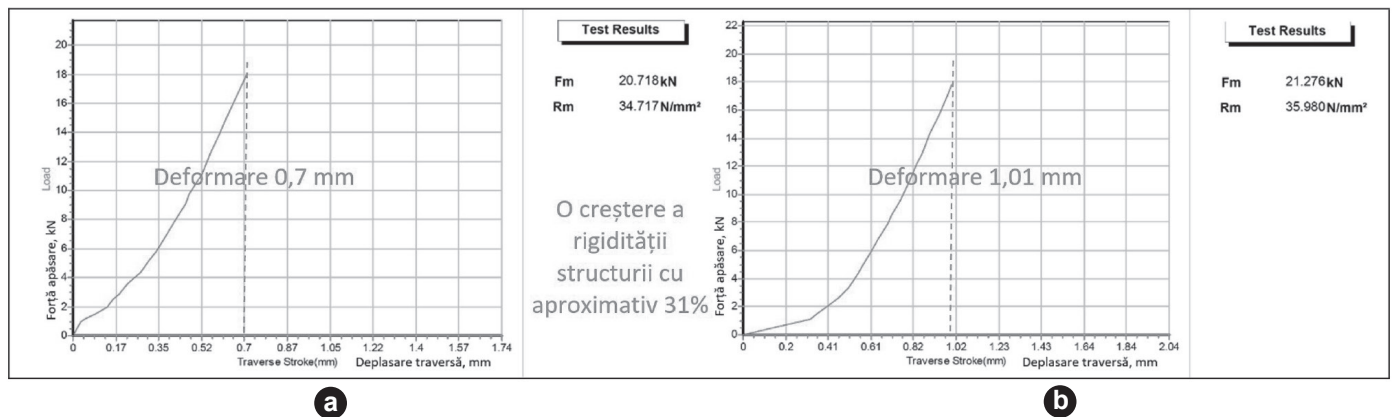
Dat fiind faptul că produsul real, realizat în experimentul de imprimare 3D, funcționează în condiții de solicitare la compresiune, s-a decis ca încercările mecanice să evidențieze tocmai comportarea la acest tip de solicitare (figura 4). Solicitarea de compresiune s-a realizat cu ajutorul unei mașini universale de încercare tip LBG 100 care dezvoltă o forță activă de 100 kN.

nations of welded joints of semi-finished products from thermoplastic materials. Part 1: Visual examination, using a stereomicroscope.

Figure 3.b shows the image of a visually examined surface area.

### 3.5 Compression testing

Given the fact that the real product, made in the 3D printing experiment, works under compression stress conditions, it was decided that the mechanical tests would highlight the behaviour under this type of stress (figure 4). The compression test was carried out using a universal testing machine, LBG 100, which can develop an active force of 100 kN.



**Figura 4.** Curba forță în funcție de deplasarea traversei de apăsare pentru probele realizate cu un adaos termic de 70°C (a.) respectiv 50°C (b.) – s-a utilizat varianta 2 a soluției constructive

**Figure 4.** The force curve according to the displacement of the pressing crossbar for the samples made with a thermal addition of 70°C (a.) and 50°C (b.) respectively – variant 2 of the process was used

Încercarea la compresiune s-a efectuat conform *SR EN ISO 604:2004 Materiale plastice. Determinarea proprietăților de compresiune.*

În figura 4 este prezentată curba forță în funcție de deplasarea traversei de apăsare.

The compression test was applied according to *SR EN ISO 604:2004 Plastics. Determination of compression properties.*

Figure 4 shows the force curve as a function of the displacement of the pressing crossbar.



## 4. Rezultate și discuții

Experimentările preliminare de imprimare au demonstrat faptul că sursa hibridă funcționează și aduce și unele avantaje legate de structura piesei imprimate. Se constată că depunerea se aplatizează datorită menținerii mai îndelungate în starea fluid-vâscoasă a polimerului, nemaifiind circulară ca în cazul încălzirii tradiționale. Astfel, structura devine mai compactă și implicit mai rezistentă.

Cele trei variante constructive s-au comportat diferit. Varianta 1, cu transmiterea fluxului de aer cald direct de la sursă, nu a permis încălzirea cu mai mult de 50°C a zonei de depunere, datorită faptului că patul de depunere nu și-a mai putut autoregla temperatura și imprimanta a fost oprită în mod automat la depășirea temperaturii reglate a patului de depunere. O astfel de variantă poate fi utilizată numai după îndepărtarea sistemului de autoreglare a temperaturii patului de depunere, dar această acțiune poate afecta aderența materialului depus la suprafața patului de depunere.

Varianta 2 a avut cea mai bună comportare, duza de ieșire a aerului cald concentrând fluxul termic pe suprafața piesei realizate prin imprimare și pe o zonă restrânsă ca suprafață din jurul acesteia. S-a putut adăuga o cantitate de căldură care să contribuie cu aproximativ 70°C la temperatura materialului depus, cantitate de căldură care a menținut polimerul în stare fluid-vâscoasă cu cel puțin 6 s mai mult timp decât la încălzirea tradițională. Acest timp suplimentar a permis polimerului să rămână în stare fluid-vâscoasă până la următoarea trecere a duzei de extrudare, așadar filamentul depus, încă fluid, a fost deformat (aplatizat) de filamentul depus la trecerea următoare.

Varianta 3 aduce fluxul termic strict pe suprafața de depunere, aspect care este un avantaj pe care celelalte variante nu îl au. Singura limitare la această variantă este necesitatea asigurării unui flux termic redus, duza de ieșire fiind de dimensiuni relativ mici (6-10 mm). Pentru aceasta nu se poate utiliza o sursă de jet de aer cald comercială, ci ar trebui concepută o sursă cu un debit sensibil mai mic.

Nu s-au înregistrat afectări ale funcționării imprimantei ca urmare a adăugării sursei termice suplimentare. Chiar și în cazul montării duzei de ieșire a aerului cald, împreună cu furtunul de aducțiune, pe capul de extrudare (varianta 3), funcționarea sistemului de avans al imprimantei a rămas neschimbat. Avantajul modificărilor geometriei depunerii este unul foarte important. În primul rând, s-a constatat o reducere dimensională a golurilor cu valori în dome-

## 4. Results and discussions

Preliminary printing experiments have shown that the hybrid source works and also brings some advantages related to the structure of the printed part. It is found that the deposition flattens due to the longer maintenance in the fluid-viscous state of the polymer, no longer circular as in the case of traditional heating. Thus, the structure becomes more compact and implicitly more resistant.

The three constructive variants behaved differently. Variant 1, with the transmission of the hot air flow directly from the source, did not allow the deposition zone to be heated by more than 50°C, due to the fact that the deposition bed could no longer self-regulate its temperature, and the printer was automatically switched off when exceeding the regulated temperature of the deposition bed. Such a variant can be used only after removing the self-regulating system of the temperature of the deposition bed, but this action can affect the adhesion of the deposited material to the surface of the deposition bed.

Variant 2 performed best, with the hot air outlet nozzle concentrating the heat flow on the surface of the printed part and a narrow area around it.

An amount of heat could be added that contributed about 70°C to the temperature of the deposited material, an amount of heat that kept the polymer in the fluid-viscous state for at least 6 s longer than with traditional heating. This additional time allowed the polymer to remain in a fluid-viscous state until the next pass of the extrusion die, so the deposited filament, still fluid, was deformed (flattened) by the filament deposited on the next pass.

Variant 3 brings the thermal flow strictly to the deposition surface, which is an advantage that the other variants do not have. The only limitation to this variant is the need to ensure a reduced thermal flow, the outlet nozzle being relatively small (6-10 mm).

A commercial hot air jet source cannot be used for this, but a source with a significantly lower flow rate should be designed.

There was no impact on printer performance as a result of adding the additional heat source. Even when mounting the hot air outlet nozzle, together with the supply hose, on the extrusion head (variant 3), the operation of the printer advance system remained unchanged.

The advantage of changes in deposition geometry is a very important one. First, a dimensional reduction of voids was found with values in the range of 8-11%

niul 8-11% pentru regimul de imprimare utilizat. Golurile formate de depuneri au o geometrie aproximativ dreptunghiulară. În cazul imprimării tradiționale laturile golurilor sunt cuprinse între 3,5-3,8 mm. Aplatizarea filamentelor depuse reduce aceste laturi la valori cuprinse între 3,2-3,4 mm. Valorile lungimilor acestor laturi, fie cu o singură sursă termică, fie cu două surse termice, depind de schema de depunere stabilită de utilizator.

În al doilea rând, curbele de compresiune au indicat o creștere a rezistenței la compresiune cu aproximativ 12% față de probele realizate în regim tradițional (cu o singură sursă termică).

## 5. Concluzii

Utilizarea surselor hibride în imprimarea 3D prin procedeul FFF este posibilă. Mai mult, ea aduce și unele avantaje, cele mai importante fiind, pe de o parte, aplatizarea depunerii, cu efect direct în reducerea dimensiunilor golurilor structurale, iar pe de altă parte creșterea ușoară a rezistenței la compresiune. Variantele utilizate au avut comportări diferite, variantele 2 și 3 fiind cele care se pot utiliza fără eforturi mari financiare sau de proiectare.

Sursa termică suplimentară trebuie să aibă o acțiune de suprafață și nu punctuală pentru a menține o zonă cât mai mare de material depus în stare fluid-vâscoasă cel puțin până la următoarea trecere. Cu toate acestea suprafața de activare termică nu trebuie să afecteze sistemul de reglare automată a temperaturii patului de depunere.

## Bibliografie/References

- [1] Seymour DK, Chae E, Grimm DG, Martín Pizarro C, Habring-Müller A, Vasseur F, Rakitsch B, Borgwardt KM, Koenig D, Weigel D. Genetic architecture of nonadditive inheritance in Arabidopsis thaliana hybrids. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2016 Nov 15;113(46):E7317-E7326. doi: 10.1073/pnas.1615268113. Epub 2016 Nov 1. PMID: 27803326; PMCID: PMC5135357
- [2] Devonie McCamey, Are Hybrid Systems Truly the Future of the Grid? NREL's Magic 8-Ball Says: "Concentrate and Ask Again."; Recent Analyses Suggest Need for Coordinated Dialogue, Consistent Modeling To Understand the Value of Hybrid Renewable Energy Systems, <https://www.nrel.gov/news/features/2021/are-hybrid-systems-truly-the-future-of-the-grid.html>
- [3] U.S. Department of Energy, Quadrennial Technology Review 2015, Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/QTR2015-6I-Process-Heating.pdf>
- [4] Mohammad Saffari, David Keogh, Mattia De Rosa, Donal P. Finn, Technical and economic assessment of a hybrid heat pump system as an energy retrofit measure in a residential building, *Energy and Buildings*, Volume 295, 2023, 113256, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113256>
- [5] Bradford Bates, Ronald I. Sims, Rodney J. Tabaczynski, Hybrid drive system, Patent: US5318142A, <https://patents.google.com/patent/US5318142A/en>
- [6] Patrick Miner, Barbara M. Smith, Anant Jani, Geraldine McNeill, Alfred Gathorne-Hardy, Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment, *Journal of Transport Geography*, Volume 115, 2024, 103817, ISSN 0966-6923, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817>
- [7] Sebeș, G., Savu, I.D., Demian, G. – New system for micro-joining Wedge Bonding of gold wires in metallic foils, using a laser-ultrasonic hybrid active head, *U.P.B. Sci. Bull., Series A: Applied Mathematics and Physics*, Vol. 74, pag. 163-170, Iss. 1, 2012, ISSN 1223-7027

for the printing regime used. The voids formed by deposits have an approximately rectangular geometry. In the case of traditional printing, the sides of the gaps are between 3.5-3.8 mm. The flattening of the deposited filaments reduces these sides to values between 3.2-3.4 mm. The values of the lengths of these sides, either with a single heat source or with two heat sources, depend on the deposition scheme established by the user.

Second, the compression curves indicated an increase in compressive strength of approximately 12% compared to samples made in the traditional regime (with a single heat source).

## 5. Conclusions

The use of hybrid sources in 3D printing by the FFF process is possible. Moreover, it also brings some advantages, the most important being, on the one hand, the flattening of the deposit, with a direct effect in reducing the sizes of the structural voids, and on the other hand, the slight increase in compression resistance.

The variants used had different behaviours, variants 2 and 3 being the ones that can be used without great financial or design efforts.

The additional heat source must have a surface and not point action to maintain as large an area of the deposited material in the fluid-viscous state at least until the next pass. However, the thermal activation surface must not affect the automatic regulation of the deposition bed temperature.