TINERI CERCETĂTORI JUNIOR RESEARCHERS

Influența densității de umplere asupra comportării la compresiune a produselor imprimate prin procedeul de Fabricație cu Filament Topit

The influence of filling density on the compression behaviour of products printed by the Fused Filament Fabrication process

Iulian Ștefan^{1*}, Cristian Chihaia¹, Remus Socol¹ ¹ Universitatea din Craiova, PhD student

Rezumat

Imprimarea 3D prin procedeul de Fabricație cu Filament Topit (FFF) are o aplicabilitate în plină creștere, în din ce în ce mai multe industrii. Din acest motiv și cercetările sunt în prezent în plină dezvoltare. Prezenta lucrare își propune să studieze modul în care unul dintre parametrii de imprimare influențează comportamentul la solicitarea de compresiune a unui produs imprimat prin acest procedeu. Au fost utilizate patru densități de umplere (40%, 60%, 80% și 100%) și s-au analizat aspectul macroscopic al structurii pieselor, precum și forma curbei tensiunii în funcție de deformație. Materialul filamentului utilizat a fost PLA (de proveniență comercială), diametrul filamentului fiind unul foarte des utilizat, 1.75 mm. S-a constatat că o creștere a densității de umplere a micșorat golurile specifice structurii de imprimare. În ceea ce privește comportamentul mecanic, s-a constatat o creștere accentuată a forței maxime de compresiune. Astfel, dacă la o densitate de umplere de 40% s-a înregistrat o forță maximă de 1.44 kN, la o densitate dublă s-a înregistrat o forță maximă de 6.27 kN, adică de 4.3 ori mai mare. În același timp, masa produsului, pentru aceleași densități de umplere a crescut de la 10.64 g la 14.48 g, adică o creștere cu mai puțin de 50%. Se constată astfel că, pentru o creștere de numai 50% a masei produsului, rezistența la compresiune a acestuia poate ajunge la creșteri de mai mult de patru ori.

Cuvinte cheie

Procedeu FFF, examinare macroscopică, comportare la solicitarea de compresiune, forță maximă, structură de imprimare

Abstract

3D printing through the process of Fusion Filament Fabrication (FFF) has a growing applicability in more and more industries. For this reason and research is currently in full development. The present paper aims to study how one of the printing parameters influences the behaviour of a product printed by this process when subjected to compression. Four infill densities (40%, 60%, 80% and 100%) were used and the macroscopic appearance of the part structure as well as the shape of the stress versus strain curve were analysed. The filament material used was PLA (of commercial origin), the diameter of the filament being a very often used one, 1.75 mm. An increase in fill density was found to decrease voids specific to the print structure. Regarding the mechanical behaviour, a sharp increase in the maximum compressive force was found. Thus, if at a filling density of 40% a maximum force of 1.44 kN was recorded, at a double density a maximum force of 6.27 kN was recorded, i.e. 4.3 times higher. At the same time, the mass of the product, for the same filling densities, increased from 10.64 g to 14.48 g, that is, an increase of less than 50%. It is thus found that, for an increase of only 50% in the mass of the product, its compressive strength can reach increases of more than four times.

Keywords

FFF process, macroscopic examination, behaviour under compressive stress, maximum force, print structure

1. Introducere

1.1 Imprimarea 3D

Imprimarea 3D este un proces de formare a unui obiect solid tridimensional de orice formă, realizat printr-un proces repetitiv de depunere de straturi succesive de material în diferite forme [1]. Practic, imprimarea 3D constă într-un proces de depunere a materialelor plastice prin sudare, astfel că studierea fenomenelor care stau la baza realizării de produse prin imprimare 3D este de fapt o studiere a unor fenomene fizice și chimice care concură la realizarea unor îmbinări sudate.

Din acest motiv, acele avantaje și dezavantaje identificate cândva de cercetători ca fiind specifice proceselor de sudare a polimerilor se regăsesc într-o oarecare măsură și la procesele de imprimare 3D.

Principalele avantaje comune celor două procese ar fi [1-5]:

- productivitate relativ ridicată a procesului, fie că este vorba despre sudarea de îmbinare, fie că este vorba despre îmbinarea filamentelor în timpul imprimării;
- rezistență mecanică suficientă a îmbinărilor realizate;
- volum redus de muncă;
- costuri specifice scăzute;
- condiții de muncă îmbunătățite;
- reducerea suprafețelor de lucru;
- integrarea facilă a postului de lucru într-o linie de asamblare automatizată.

Pentru a realiza îmbinarea elementelor de filament din material plastic, trebuie să fie respectate câteva condiții esențiale [3-4]:

- încălzirea și menținerea filamentului la o temperatură care trebuie să fie încadrată între temperaturile critice ale polimerilor, cea de curgere și cea de degradare termică;
- realizarea unui contact optim între elementele de filament aflate în contact în urma depunerii;
- asigurarea unui timp optim pentru desfășurarea procesului de îmbinare.

Unul dintre cele mai utilizate procedee de imprimare 3D a polimerilor este Fused Filament Fabrication (FFF), cunoscut și sub denumirea de Fused Deposition Modeling (FDM), figura 1. Această tehnologie a fost inventată în anii '80 de către Scott Crump, fondatorul companiei Stratasys [5], care este una dintre cele mai importante companii din industria imprimării 3D. De ce există două denumiri pentru același proces? Fused Deposition Modeling este un termen înregistrat ca marcă de Stratasys, fiind asociat cu tehnologia care folosește filamente de plastic topit pentru a construi obiecte strat cu strat. Fused Filament Fabri-

1. Introduction

1.1 3D printing

3D printing is a process of forming a three-dimensional solid object of any shape, achieved through a repetitive process of depositing successive layers of material in different shapes [1]. Basically, 3D printing consists of a process of depositing plastic materials by welding, so studying the phenomena that underlie the creation of products by 3D printing is a study of some physical and chemical phenomena that compete for the realization of welded joints.

For this reason, those advantages and disadvantages once identified by researchers as specific to polymer welding processes are to some extent also found in 3D printing processes.

The main common advantages of the two processes would be [1-5]:

- relatively high productivity of the process, whether it is welding joining two parts or joining two filaments during 3D printing;
- sufficient mechanical strength of the joints made;
- reduced volume of work;
- low specific costs;
- improved working conditions;
- significant reduction of work surfaces;
- easy integration of the workstation into an automated assembly line.

To achieve the joining of plastic filament elements, several conditions must be met [3-4]:

- heating and maintaining the filament at a temperature between the flowing critical temperature and the thermal degradation temperature;
- achieving an optimal contact between the filament elements in contact following deposition;
- ensuring an optimal time for carrying out the joining process.

One of the most widely used processes for 3D printing of polymers is Fused Filament Fabrication (FFF), also known as Fused Deposition Modeling (FDM), figure 1. This technology was invented in the 80s by Scott Crump, the founder of Stratasys [5], which is one of the most important companies in the 3D printing industry.

Why are there two names for the same process? Fused Deposition Modeling is a Stratasys trademarked term associated with technology that uses fused plastic filaments to build objects layer by layer. Fused Filament Fabrication was later introduced by the open-source community to describe the same cation a fost introdus ulterior de comunitatea opensource pentru a descrie aceeași tehnologie, fără a încălca drepturile de autor asupra termenului FDM. Acest termen este mai frecvent utilizat pentru imprimantele 3D accesibile și open-source, cum ar fi cele destinate utilizatorilor hobby. În continuare, se va folosi termenul generic FFF.

Tehnologia FFF este relativ simplă și are o funcționare asemănătoare sudării prin topire cu material de adaos. Cu ajutorul unui software specializat, modelul 3D al piesei dorite este inițial descompus în secțiuni transversale [6], numite straturi. În timpul procesului de imprimare, un filament din plastic este trecut printr-un extrudor care îl încălzește până la topire și îl aplică uniform pentru a construi fizic straturile digitale [7].

După realizarea fiecărui strat, procesul continuă cu următorul strat, iar modelul 3D este creat prin depunerea precisă strat după strat, conform fișierului CAD.

Capul de extrudare (extrudorul) este încălzit la o temperatură suficient de mare pentru a topi filamentul [8], deplasându-se pe orizontală și verticală sub controlul unui sistem de comandă numerică, coordonat de aplicația software CAM a imprimantei [8]. Pentru a preveni deformarea pieselor cauzată de răcirea rapidă a plasticului, unele imprimante 3D profesionale sunt echipate cu o cameră de imprimare închisă și încălzită [9]. technology without copyrighting the term FDM. This term is more commonly used for affordable and open-source 3D printers, such as those aimed at hobby users. Next, the generic term FFF will be used. The FFF technology is relatively simple and works similar to fusion welding.

With the help of specialized software, the 3D model of the desired part is initially decomposed into cross-sections [6], called layers. During the printing process, a plastic filament is passed through an extruder that heats it until it melts and applies it evenly to physically build the digital layers [7].

After each layer is made, the process continues with the next layer and the 3D model is created by precisely depositing layer by layer according to the CAD file.

The extrusion head is heated to a temperature high enough to melt the filament [8], moving horizontally and vertically under the control of a numerical control system, coordinated by the printer's CAM software [8]. To prevent deformation of parts caused by rapid cooling of the plastic, some professional 3D printers are equipped with a closed and heated printing chamber [9].



Figura 1. Procedeul FFF – schiță de principiu Figure 1. FFF process – sketch

1.2 Produsele realizate prin imprimare

Produsele imprimate 3D prin procedeul FFF prezintă caracteristici mecanice care depind de o serie de parametri de imprimare [1-10]. Aceste caracteristici mecanice pot varia în funcție de materialul utilizat, condițiile de imprimare și designul piesei [3,5,10]. Orientarea depunerilor influențează direct proprietățile mecanice ale produsului [2,5,7,8]. De exem-

plu, o piesă imprimată cu straturi orizontale este mai susceptibilă la fisurare de-a lungul planului de depunere, deoarece adeziunea inter-straturi este mai slabă decât rezistența materialului în sine [2,5].

1.2 Products made by printing

3D printed products by the FFF process have mechanical characteristics that depend on a series of printing parameters [1-10]. These mechanical characteristics can vary depending on the material used, printing conditions and part design [3,5,10].

The orientation of the deposits directly influences the mechanical properties of the product [2,5,7,8]. For example, a printed part with horizontal layers is more susceptible to cracking along the deposition plane because the inter-layer adhesion is weaker than the strength of the material itself [2,5]. TherePrin urmare, orientarea optimă a depunerilor poate crește rezistența la tracțiune și durabilitatea piesei [7]. Înălțimea stratului depus (grosimea fiecărui strat depus în timpul imprimării) influențează, la rândul ei proprietățile mecanice ale piesei imprimate. Straturile subțiri pot îmbunătăți rezistența mecanică, deoarece adeziunea între ele este mai puternică [6]. Straturi mai subțiri oferă o mai bună aderență între straturi și finisaj fin al suprafeței, însă cresc timpul de imprimare.

Straturile groase scurtează timpul de producție, dar pot reduce rezistența piesei datorită interacțiunii mai scăzute dintre straturi [6].

Temperatura de imprimare a duzei de extrudare trebuie să asigure o topire corespunzătoare a filamentului la depunere. O temperatură prea scăzută poate provoca o aderență slabă între straturi, ceea ce duce la slăbirea piesei [11]. O temperatură prea ridicată poate afecta structura moleculară a materialului afectând comportarea mecanică [11]. De exemplu, temperaturile prea mari pot duce la degradarea termică a polimerului.

Viteza de răcire a polimerului depus poate produce tensiuni interne în piesă și chiar deformări [12]. În timpul imprimării FFF, răcirea controlată este esențială pentru evitarea defectelor. Un sistem de răcire activ poate îmbunătăți stabilitatea piesei, dar o răcire prea rapidă poate afecta legăturile inter-straturi [12].

Densitatea și tipul de umplere afectează rigiditatea și rezistența piesei [1,5,6]. O piesă cu o densitate scăzută (de exemplu, 10-20%) va fi mai ușoară, dar și mai puțin rezistentă la forțe externe. O densitate mare (peste 50%) crește rezistența mecanică a piesei imprimate, dar și consumul de material și timpul de imprimare.

O viteză de imprimare prea mare poate afecta caracteristicile mecanice ale piesei, deoarece materialul poate să nu aibă suficient timp pentru a se răci și a se îmbina corespunzător cu stratul depus anterior. O viteză prea mică, deși oferă o îmbinare mai bună a straturilor, va crește durata de imprimare și poate provoca deformări [5].

Tipul materialului filamentului utilizat necesită anumite valori pentru parametrii de imprimare. Fiecare material are proprietăți mecanice diferite. PLA este cunoscut pentru rigiditatea sa, dar este fragil la șocuri mecanice și temperaturi ridicate. ABS are o bună rezistență la impact și temperaturi, dar este mai dificil de imprimat datorită tendinței de a se deforma.

Materialele compozite sau specializate, precum cele cu fibre de carbon sau kevlar, pot aduce beneficii suplimentare, cum ar fi creșterea rezistenței fără a adăuga greutate semnificativă. fore, optimal deposition orientation can increase the tensile strength and durability of the printed part [7].

The layer height (the thickness of each layer deposited during printing) in turn influences the mechanical properties of the printed part.

Thin layers can improve mechanical strength because the adhesion between them is stronger [6]. Thinner layers provide better interlayer adhesion and smoother surface finish but increase print time. Thicker layers shorten production time but can reduce part strength due to lower interaction between layers [6].

The printing temperature of the extruder must ensure proper melting of the filament upon deposition. Too low a temperature can cause poor adhesion between the layers, leading to a loosening of the part [11].

Too high a temperature can affect the molecular structure of the material, reducing the mechanical properties [11]. For example, too high temperatures can lead to thermal degradation of polymers.

The cooling rate of the deposited polymer can produce internal stresses in the part and even deformations [12]. During FFF printing, controlled cooling is essential to avoid defects. An active cooling system can improve the stability of the part, but too fast cooling can damage the inter-layer bonds [12].

The density and type of filling affect the stiffness and strength of the part [1,5,6]. A part with a low density (eg 10-20%) will be lighter, but also less resistant to external forces. A high density (over 50%) increases the mechanical strength of the printed part, but also material consumption and printing time.

Too high a print speed can affect the mechanical characteristics of the part, as the material may not have enough time to cool and bond properly with the previously deposited layer. Too low a speed, although it provides better adhesion between layers, can increase the print time and cause thermal distortion [5].

The type of filament material used requires certain values for the printing parameters. Each material has different mechanical properties. PLA is known for its rigidity, but it is brittle at mechanical shocks and high temperatures. ABS has good impact and temperature resistance but is more difficult to print due to its tendency to warp.

Composite or specialized materials such as carbon fiber or Kevlar can provide additional benefits such as increased strength without adding significant weight. Prezenta lucrare își propune să pună în evidență influența unor parametri de imprimare asupra comportării mecanice la solicitarea de compresiune. S-a ales această solicitare fiindcă un mare număr de aplicații pentru care piesele sunt realizabile prin imprimare 3D sunt supuse acestui tip de solicitare. Se vor avea în vedere influențele densității de imprimare și a vitezei de imprimare (timpul de imprimare) asupra comportării materialului depus.

2. Program experimental

2.1 Produsul realizat prin imprimare

Produsul propus pentru a fi imprimat și evaluat este prezentat în figura 2. Este vorba despre un separator electric utilizat în circuitele electrice de putere mică.



The present work aims to highlight the influence of some printing parameters on the mechanical behaviour under compression stress. This request was chosen because a large number of applications for which parts are 3D printable are subject to this type of request.

The influences of print density and print speed (print time) on the behaviour of the deposited material will be considered.

2. Experimental design

2.1 Product to print

The product proposed to be printed and evaluated is shown in figure 2. It is an electrical separating device used in low power electrical circuits.



Figura 2. Produsul de imprimat Figure 2. Product to print

Imprimarea s-a realizat cu o imprimantă 3D DaVinci 2.0 având două capete de extrudare.

2.2 Parametrii procesului de imprimare FFF

Parametrii procesului de imprimare au fost aleși conform recomandărilor producătorului de echipament de imprimare FFF, pornind de la natura materialului filamentului, PLA. Valorile parametrilor de imprimare utilizate în experimentări sunt prezentate în tabelul 1. Se poate observa că parametrii care au fost variabilele de cercetare sunt densitatea de umplere și timpul de imprimare. Printing was done with a DaVinci 2.0 3D printer having two active extrusion heads.

2.2 Parameters of the FFF printing process

The parameters of the printing process were chosen according to the recommendations of the manufacturer of the FFF printing equipment, starting from the nature of the filament material, PLA. The values of the printing parameters used in the experiments are shown in Table 1.

It can be seen that the parameters that were the research variables are the filling density and the printing time.

Parametru	Valoare	Parametru	Valoare					
Parameter	Value	Parameter	Value					
Înălțimea stratului	0.1 mm	Materialul filamentului						
Layer height	0.1 11111	Filament material	PLA					
Unghiul de depunere	0°	Diametrul filamentului	1 75 mm					
Angle of deposition	0	Filament diameter	1,75 mm					
Densitate de umplere	40/60/80/100%	Temperatură duză de extrudare	220°C					
Resolution of filling	40/60/80/100%	Temperature of extrusion nozzle						
Model de umplere	Grilă	Temperatură pat depunere	60°C					
Type of filling	Grid	Temperature of deposition bed						
Diametrul duzei	0.4 mana	Timp de imprimare	40 / 46 / 54 / 65 min					
Diameter of nozzle	0.4 mm	Printing time						

Tabel 1. Parametrii procesului de imprimare Table 1. Parameters of printing process

3. Rezultate și discuții

Utilizând parametrii din tabelul 1 au fost imprimate patru piese cu densitățile de imprimare menționate în tabel. Aceste piese au fost examinate vizual și apoi au fost supuse încercării de compresiune utilizând o mașină universală de încercare tip LBG 100 (forța maximă aplicabilă este egală cu 100 kN).

3.1 Examinarea vizuală a probelor

În figura 3 sunt prezentate imagini macroscopice ale secțiunilor celor patru piese imprimate.



a. 40%



3. Results and discussions

Using the parameters in Table 1, four products were printed at the print densities listed in the table. These parts were visually examined and then subjected to the compression test using a universal testing machine type LBG 100 (the maximum applicable force is equal to 100 kN).

3.1 Materials used in printing

Figure 3 shows macroscopic images of the sections of the four printed parts.



b. 60%



c. 80% d. 100% Figura 3. Imagini macroscopice ale secțiunilor probelor imprimate 3D Figure 3. Macroscopic images of the transverse sections of 3D printed specimens

În ceea ce privește calitatea structurii depuse, se pot consemna următoarele aspecte:

- 40%:
 - o Dimensiunile celor mai mari goluri măsurate ajung la aproximativ 5.5-6.0 mm
 - Au fost identificate următoarele imperfecțiuni de material: fisuri după o direcție perpendiculară pe direcția de aplicare a forței și exfolieri ale straturilor depuse
- 60%:
 - o Dimensiunile celor mai mari goluri măsurate ajung la aproximativ 4.0-4,5 mm
 - o Au fost identificare fisuri la nivelul straturilor interioare
 - o Elementele tăiate au suferit deformații de valori mari, în zona de mijloc

Regarding the quality of the submitted structure, the following aspects can be noted:

- 40%:
 - o The dimensions of the largest gaps measured reach approximately 5.5-6.0 mm
 - o The following material imperfections were identified: cracks along a direction perpendicular to the direction of force application and exfoliation of the deposited layers
- 60%:
 - o The dimensions of the largest gaps measured reach approximately 4.0-4.5 mm
 - o Cracks were identified at the level of the inner layers
 - o The cut elements suffered large deformations in the middle area

- 80%
 - o Dimensiunile celor mai mari goluri măsurate ajung la aproximativ 3.0-3.5 mm
 - o Piesa nu a fisurat vizibil la suprafață, fisurările fiind doar la nivelul straturilor interioare
 - o Elementele tăiate au suferit deformații de valori mari, în zona de mijloc
- 100%
 - o Deși așteptarea era în direcția unei structuri fără goluri, totuși au fost identificate goluri, dimensiunile acestora fiind între 0.5-1.0 mm
 - Piesa nu a fisurat vizibil, dar deformațiile sunt cele mai mari tocmai din cauza aceasta, în cooperare cu forțele mari aplicate de mașina de încercare
 - o Elementele tăiate, dar și orificiul, au suferit deformații de valori mari.

Din determinările dimensionale s-au constatat abateri de la valorile de proiectare, abateri care au fost cu atât mai mari cu cât densitatea de umplere a fost mai mică (tabel 2). Diferențele nu au fost mari, dar o astfel de influență trebuie notată, mai ales că nici pentru o densitate de umplere de 100% nu s-au realizat dimensiunile din proiect.

- 80%
 - o The dimensions of the largest gaps measured reach approximately 3.0-3.5 mm
 - o The piece did not visibly crack on the surface, the cracks being only at the level of the inner layers
 - o The cut elements suffered large deformations in the middle area
- 100%
 - o Although the expectation was in the direction of a void-free structure, voids were still identified, their dimensions being between 0.5-1.0 mm
 - o The part did not visibly crack, but the deformations are the largest precisely because of this, in cooperation with the high forces applied by the testing machine
 - o The cut elements, as well as the hole, suffered large deformations.

From the dimensional determinations, deviations from the design values were found, deviations that were the greater the lower the filling density (table 2). The differences were not large, but such an influence should be noted, especially since even for a filling density of 100% the dimensions in the project were not achieved.

15	Dimensiuni conform desen produs Product dimensions according to design, [mm]		Dimensiunile măsurate ale produselor imprimate The measured dimensions of the printed products						
			[mm]						
35 + 27 - 39 -			40%	60%	80%	100%			
	Lungime	35.0	34.1	34.2	34.7	34.8			
	Lățime	30.0	28.8	28.8	28.9	29.4			
	Înălțime	45.0	44.4	44.5	44,5	44.8			
	Grosime flanşă	10.0	8.8	9.1	9.2	9.1			
A	Grosime laterale	7.0	6.4	6.7	6.9	7.0			
	Diametru orificiu	15.0	14.6	14.7	14.8	14.8			

Tabel 2. Compararea valorilor dimensionilor probelor imprimate 3D cu valorile de proiectareTable 2. Comparison of dimensional values of 3D printed samples with design values

Timpii de imprimare au crescut neliniar de la 40 min pentru densitatea de umplere de 40%, la 65 de min pentru umplerea de 100%. În același timp, creșterea de masă depusă a fost aproape liniară, fiecare creștere cu 20% fiind tradusă prin aproximativ 2 g de material depus în plus.

3.2 Încercarea la compresiune

Încercarea la compresiune s-a realizat conform SR EN ISO 604:2004. În figura 4 este prezentată o imagine din timpul încercării.

Rezultatele încercărilor de compresiune sunt prezentate în figurile 5 a-d.

În cazul densității de umplere de 40% s-a înregistrat o rezistență mecanică relativ mică la încercarea de compresiune, materialul fisurând în mai puțin de 10 s și după o deplasare de aproximativ 0,78 mm. Print times increased non-linearly from 40 min for 40% fill density to 65 min for 100% fill. At the same time, the increase in deposited mass was almost linear, with each 20% increase translating into approximately 2 g of additional deposited material.

3.2 Compression tests

The compression test was carried out according to SR EN ISO 604:2004. Figure 4 shows an image during the test.

The results of the compression tests are shown in Figures 5 a-d.

At 40% filler density, relatively little mechanical strength was recorded in the compression test, with the material cracking in less than 10 s and after a displacement of approximately 0.78 mm.



Figura 4. Imagine din timpul încercării la compresiune Figure 4. Image of the testing process



Figura 5. Curbele forță în funcție de deplasarea traversei de apăsare înregistrate în timpul încercărilor **Figure 5.** The force curves as a function of the displacement of the pressure beam recorded during the tests

Perforarea a devenit ovală, diametrul maxim fiind de 16 mm, iar cel minim de aproximativ 14 mm.

Pentru densitatea de umplere de 60% rezistența mecanică la încercarea de compresiune a fost aproximativ dublă față de situația precedentă (2,97 kN The perforation became oval, the maximum diameter being 16 mm, and the minimum approximately 14 mm. For the 60% fill density the mechanical strength in the compression test was approximately double that of the previous situation (2.97 kN versus 1.44 kN), față de 1,44 kN), materialul fisurând după o deplasare de aproximativ 2,28 mm. S-a păstrat ovalitatea găurii, diametrul maxim fiind de această dată cel din proiect, adică 15 mm, iar cel minim s-a menținut la aproximativ 14 mm.

Umplerea de 80% a mai dublat o dată valoarea rezistenței mecanice de la primul test, înregistrându-se o valoare a rezistenței mecanice la încercarea de compresiune de 4,3 ori mai mare față de situația inițială (6,27 kN față de 1,44 kN); materialul a fisurat după o deplasare de aproximativ 2,72 mm. Ovalitatea găurii centrale a fost exagerată, diametrul maxim fiind de 17 mm, iar cel minim de aproximativ 13 mm, adică o abatere de 2 mm și în plus și în minus.

Creșterea densității de umplere la 100% a condus la înregistrarea unei rezistențe mecanice la încercarea de compresiune de 8 ori mai mare comparativ cu situația specifică densității de umplere de 40% (11,68 kN față de 1,44 kN), materialul fisurând după o deplasare de aproximativ 12,35 mm. Diametrul maxim al perforației a fost egal cu 18 mm, iar cel minim cu aproximativ 11 mm.

O vizualizare grafică a rezultatelor este prezentată în figurile 6 (variația masei produsului imprimat cu densitatea de umplere), 7 (variația forței de compresiune maxime înregistrate cu densitatea de umplere) și 8 (variația timpului de imprimare cu densitatea de umplere). with the material cracking after a displacement of approximately 2.28 mm. The ovality of the hole was preserved, this time the maximum diameter being the one in the project, i.e. 15 mm, and the minimum was kept at approximately 14 mm.

The 80% filling doubled the mechanical strength value from the first test, recording a mechanical strength value in the compression test 4.3 times higher than the initial situation (6.27 kN against 1.44 kN); the material cracked after a displacement of approximately 2.72 mm. The ovality of the central hole was exaggerated, the maximum diameter being 17 mm and the minimum about 13 mm, i.e. a deviation of 2 mm plus and minus.

Increasing the infill density to 100% resulted in an 8 times higher compression test mechanical strength being recorded compared to the situation specific to the 40% infill density (11.68 kN versus 1.44 kN), with the material cracking after a displacement of approximately 12.35 mm. The maximum diameter of the perforation was equal to 18 mm, and the minimum to about 11 mm. A graphical visualization of the results is shown in Figures 6 (variation of mass of the printed product with filling density), 7 (variation of maximum compression force recorded with filling density) and 8 (variation of printing time with infill density).



Figura 6. Variația masei produsului imprimat cu densitatea de umplere **Figure 6.** Variation of mass of the printed product with filling density





Figure 7. Variation of maximum compression force recorded with filling density



Figura 8. Variația timpului de imprimare cu densitatea de umplereFigure 8. Variation of printing time with filling density

4. Concluzii

În urma cercetărilor experimentale au rezultat următoarele concluzii:

1. Creșterea rezoluției de imprimare a condus la creșterea timpului de imprimare, la creșterea

4. Conclusions

As a result of the experimental research, the following conclusions resulted:

1. The increase in the printing resolution has led to an increase in the printing time, an increase masei produsului și la creșterea rezistenței acestuia. Utilizarea de material de adaos suplimentar cu fiecare creștere a densității de umplere, împreună cu variația crescătoare a timpului de imprimare, conduce implicit și la o creștere a costului produsului imprimat.

- 2. O rezoluție mică de imprimare a condus la exfolieri ale straturilor depuse, forța la care au apărut primele exfolieri fiind cu atât mai mică cu cât rezoluția a fost mai mică.
- 3. O dată cu creșterea rezoluției de imprimare s-a modificat și modul de comportare a piesei, pentru rezoluții reduse modul de comportare fiind acela al unei piese poroase, pe când la densități de umplere mai mari forma curbei de compresiune a avut o alură similară curbelor pieselor pline.

in the mass of the product and an increase in its strength. The use of additional filler material with each increase in fill density, together with the increasing variation in print time, also implicitly leads to an increase in the cost of the printed product.

- 2. A low print resolution led to exfoliation of the deposited layers, the force at which the first exfoliation appeared was lower the lower the resolution.
- 3. Along with the increase in the printing resolution, the behaviour of the part also changed, for low resolutions the behaviour was that of a porous part, while at higher resolutions the behaviour was like the behaviour of solid parts.

Bibliografie/References

[1] Prateek k. Jain, Prashant K. Jain, Use of 3D printing for home applications: A new generation concept, Material Today: Proceedings 43 (2021) 602 – 607

[2] Themistoklis Sfetsas, Stefanos Patsatis, Afroditi Chioti, A review of 3D printing techniques for bio-carrier fabrication, Journal of Cleaner Production 318 (2021) 128469

[3] M. Manoj Prabhakar, A.K. Saravanan, A. Haiter Lenin, I. Jerin leno, K. Mayandi, P. Sethu Ramalingam, A short review on 3D printing methods, process parameters and materials, Materials Today: Proceedings 45 (2021) 6108–6114

[4] Anketa Jandyal, Ikshita Chaturvedi, Ishika Wazir, Ankush Raina, PhD, Mir Irfan Ul Haq, PhD, 3D printing –A review of processes, materials and applications in industry 4.0, Sustainable Operations and Computers 3 (2022) 33–42

[5] Shahrubudin, N.; Lee, T.C.; Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, 376 Procedia Manufacturing, 2019, Volume 35, Pages 1286-1296, ISSN 2351-9789

[6] Najmon, J.C.; Raeisi, S.; Tovar, A. 2- Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry, Edi-378 tor(s): Francis Froes, Rodney Boyer, Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier, 2019, Pages 7-31, 379 https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9

[7] Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, 381 methods, applications and challenges. Composites. Part. B Engineering. 2018; volume 143:172–196. doi: 10.1016/j.compo-382 sitesb.2018.02.012 383

[8] Zhu, C.; Li, T.; Mohideen, M.M.; Hu, P.; Gupta, R., Ramakrishna, S.; Liu, Y. Realization of circular economy of 3D printed 384 plastics: A review. Polymers. 2021; 13:744. doi: 10.3390/polym13050744 385

[9] Pramanik, D.; Roy, N.; Kuar, A.S. Additive Manufacturing of Polymer Materials: Recent Developments, Editor(s): M.S.J. 386 Hashmi, Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers, Elsevier, 2022, Pages 105-114

[10] Gao, X.; Yu, N.; Li, J. Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components, Woodhead Publishing, 2020, Pages 303-330

[11] Kafle, A; Luis, E; Silwal, R; Pan, H.M.; Shrestha; P.L.; Bastola, A.K. 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling 394 (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). Polymers (Basel). 2021, 15; 13(18):3101
[12] K.B. Mustapha, Khaled Mohamed Metwalli, A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites, European Polymer Journal 156 (2021) 110591

Pentru citare:

Ștefan, I., Chihaia, C., Socol, R., The influence of filling density on the compression behaviour of products printed by the Fused Filament Fabrication process, Sudura, nr. 3 (2024), year XXXIV, 43-52

www.asr.ro