

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE
PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI
AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D
ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE
ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE**

Adelina Hrițuc

Conducător de doctorat: Laurențiu Slătineanu

IAȘI, 2024

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE
PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI
AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D
ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE
ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE**

Adelina Hrițuc
Domeniul: Inginerie industrială

Președinte comisie doctorat:

Conducător de doctorat:

Referenți oficiali:

prof. univ. dr .ing. Oana Dodun

prof. univ. dr. ing. Laurențiu Slătineanu

prof. univ. dr. ing. Cătălin Fetecău

prof. univ. dr .ing. Liviu Daniel Ghiculescu

prof. univ. dr. ing. Gheorghe Nagîț

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 25.09.2024, la ora 11:30 în sala TCM7 al departamentului TCM, din cadrul facultății CMMI, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR
PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI
DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE",**

elaborate de doamna **HRIȚUC ADELINA** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Dodun Oana, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași - președinte
2. Slătineanu Laurențiu, prof. univ. dr. ing, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași - conducător de doctorat
3. Fetecău Cătălin, prof. univ. dr. ing., Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați - referent oficial
4. Ghiculescu Liviu Daniel, prof. univ. dr. ing., Universitatea Politehnica din București - referent oficial
5. Nagiț Gheorghe, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași -referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof. univ.dr.ing. Dan Cașcaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagiț

Cuprins

INTRODUCERE	5
Capitolul 1	7
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR DIN DOMENIUL FABRICAȚIEI ADITIVE PRIN TIPĂRIRE 3D	7
Concluzii la capitolul 1:	9
Capitolul 2	10
OBIECTIVE ALE CERCETĂRIILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR FACTORI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE	10
Concluzii la capitolul al 2-lea:	12
Capitolul 3	13
CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE	13
Analiza sistemică	13
Utilizarea metodei Ishikawa în cazul tipăririi 3D	13
Utilizarea metodei diagramei de idei, aplicată în cazul tipăririi 3D	14
Utilizarea analizei SWOT în cazul tipăririi 3D	14
Utilizarea proiectării axiomatiche în cazul cercetării proceselor și echipamentelor utilizate pentru tipărirea 3D	15
Utilizarea metodei de analiză cu elemente finite pentru modelarea unor procese și caracteristici specifice tipăririi 3D	16
Concluzii la capitolul al 3-lea:	16
Capitolul 4	17
ECHIPAMENTE ȘI MATERIALE FOLOSITE ÎN CADRUL CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE	17
Echipament utilizat pentru studiul transferului termic în cazul pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D	18
Balanța analitică RADWAG utilizată pentru măsurarea masei pieselor din materiale plastice tipărite 3D	18
Concluzii la capitolul al 4-lea:	19
Capitolul 5	19
CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE	19
Aplicarea metodei de planificare a încercărilor experimentale în cazul cercetării preciziei dimensionale la tipărirea 3D a unor piese din materiale plastice	19
Cercetarea influenței condițiilor de tipărire 3D asupra rezistenței la compresiune a unor epruvete cave de formă sferică	20
Analiza rezistenței la abraziune a unor materiale plastice utilizate la epruvetele fabricate prin tipărire 3D	20
Încercarea la tracțiune a unor epruvete de tip inel din materiale plastice, fabricate prin tipărire 3D	21
Capacitatea pieselor tipărite 3D din materiale plastice de a permite transferul de energie termică	21
Capacitatea de izolare fonică a pieselor din materiale plastice tipărite 3D	22
Influența diferiților factori asupra durității materialului plastic din piese fabricate prin tipărire 3D	23
Influența diferiților factori asupra rugozității suprafețelor pieselor fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D	24
Influența diferiților factori asupra rezistenței la compresiune a unor epruvete din material plastic compozit fabricate prin tipărire 3D	24
Concluzii la capitolul al 5-lea:	25
Capitolul 6	25
CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE	25
Concluzii proprii	25
Contribuții personale	31
Direcții viitoare de cercetare	31
Bibliografie selectivă	32
Lista lucrărilor aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale	34
Lista lucrărilor care nu se află în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale	36
Propuneri de invenție aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale	38
Propuneri de invenție care nu sunt aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale	38

INTRODUCERE

Tema tezei a apărut în urma colaborărilor anterioare cu cadre didactice din cadrul Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, identificând astfel posibile direcții de interes privind subiectul tipăririi 3D a pieselor din materiale plastice. Totodată, au fost luate în considerare și echipamentele disponibile și colaborările ce puteau fi dezvoltate pentru a contura un cadru de investigații referitoare la procesul de tipărire 3D și, astfel, asemenea aspecte au contribuit la clarificarea obiectivelor susceptibile de abordare în cadrul prezentei teze.

În primul capitol al tezei s-a realizat prezentarea procesului de tipărire 3D și locul acestuia între celelalte metode de fabricație. S-a început cu plasarea și evoluția istorică a procesului, continuând cu tipurile de tipărire 3D utilizate la scară largă și specificitățile acestora. Ulterior, un element important în partea introductivă a fost acoperirea termenilor și referințelor menționate încă din titlul tezei, astfel că se prezintă parametrii procesului de tipărire 3D, proprietățile de exploatare ce pot fi influențate sau de interes pentru procesul de tipărire 3D și a aplicațiilor acestuia. Totodată, în vederea conturării cercetărilor ce pot fi acoperite în cadrul tezei, s-au analizat cercetările deja efectuate în legătură cu tema tezei și s-au identificat elemente ce pot constitui puncte de pornire sau premise pentru cercetările ulterioare.

În cel de-al doilea capitol al tezei s-au detaliat direcțiile de cercetare pentru partea teoretică și partea experimentală. Pentru aceasta, s-au considerat metodele ce pot fi abordate teoretic și apoi experimental pentru obținerea unor rezultate elocvente privind proprietățile de exploatare ale pieselor din materiale plastice obținute prin tipărire 3D.

Partea de cercetare teoretică se constituie în cel de-al treilea capitol al tezei, capitol în care au fost aplicate câteva metode teoretice de analiză a proceselor de tipărire 3D, urmărindu-se identificarea principalilor factori de intrare ai acestor procese, a unor soluții constructive de dispozitive sau pentru analiza teoretică a influenței exercitate de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra valorilor parametrilor de ieșire ai acestui proces.

S-au ales câteva metode de analiză teoretică, iar pe baza premiselor s-au clarificat parametrii și condițiile pentru cercetările experimentale. Astfel, prin analiză sistemică s-au identificat factorii care pot influența procesul de tipărire 3D ce pot fi controlați și optimizați în vederea obținerii unor rezultate mai bune ale procesului, cu evidențierea totodată a factorilor perturbatori ce intervin în timpul procesului și pot afecta calitatea pieselor obținute. În urma acestei analize sistemice, s-au evidențiat parametrii de ieșire din procesul de tipărire ce au constituit puncte de analiză pentru partea experimentală, expusă ulterior.

Prin metodele Ishikawa și cea a diagramei de idei s-au realizat reprezentări prin care, pe de o parte, au fost expuși parametrii procesului de tipărire ce pot influența calitatea pieselor tipărite și astfel, identificarea acelor parametri ce odată modificați într-un mod optim pot îmbunătăți procesul, iar pe de altă parte, prin diagrama de idei s-a realizat expunerea într-o manieră simplistă a procesului de tipărire sau a unor elemente ale procesului, în cazul de față a materialelor ce pot fi folosite și combinate încât să rezulte noi modalități de investigare a procesului de tipărire.

Tot în partea teoretică, prin metoda SWOT s-au expus elemente ale procesului de tipărire care fac acest proces de interes pentru piață, dar totodată, considerând punctele slabe sau îmbunătățirile ce pot fi aduse, să se optimizeze procesul. Toate metodele de mai sus prezintă elemente care puse la un loc oferă informații despre posibilitățile de realizare ale unor cercetări și optimizare a procesului de tipărire 3D.

Prin proiectarea axiomatică s-au identificat echipamentele și subsistemele componente, necesare cercetărilor experimentale ulterioare. Metoda aceasta prezintă marele avantaj al unei analize schematice și cu limitarea erorilor în proiectare, prin evidențierea unor dependențe directe între cerințele sistemului, a echipamentului necesar, și a parametrilor de proiectare ce îndeplinesc aceste cerințe.

Nu în ultimul rând, tot o analiză teoretică a fost și partea de simulare mecanică, termică și fonică, întrucât premisele de cercetare vizau aceste proprietăți de exploatare, iar partea de analiză cu element finit oferă posibilitatea investigării teoretice a unui sistem și observarea unor solicitări, a unor proprietăți, în mod digital, fără necesitatea investirii în epruvete și echipamente efective. După cum s-a observat și în analizele efectuate, softul de simulare cu element finit oferă modelarea complexă a sistemelor necesare investigării proprietăților de exploatare mai sus menționate, iar rezultatele comparației simulare teoretică – cercetări experimentale, observate în urma realizării și a unor experimente practice, au arătat încă o dată rezultate apropiate în cazul unor solicitări de tracțiune, compresiune sau încălzire.

În capitolul al patrulea s-au prezentat echipamentele și dispozitivele principale folosite în cadrul cercetărilor experimentale realizate în cadrul tezei de doctorat. Aceste echipamente sunt cele de care dispune Departamentul Tehnologia Construcțiilor de Mașini, de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, dar și a unor echipamente din cadrul departamentelor unora dintre colaboratori, coautorii unor cercetări științifice realizate și finalizate cu publicarea unor lucrări, echipamente cu precizii și performanțe variabile, dar cu funcționalități potrivite și eficiente în vederea observării, analizei și prelucrării datelor privind proprietățile de exploatare ale pieselor tipărite 3D din materiale plastice.

În capitolul al cincilea au fost expuse aspecte referitoare la partea de cercetare experimentală prin descrierea modului de realizare a încercărilor experimentale, a factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D a unor categorii de piese din materiale plastice, a rezultatelor cercetărilor, cu un accent mai pronunțat pe influența exercitată de către unii factori de intrare asupra proprietăților de interes din punctul de vedere al exploatării pieselor fabricate prin procese de tipărire 3D. Aceste cercetări au vizat proprietăți multiple, utilizarea metodei planificării cercetărilor experimentale în vederea obținerii epruvetelor de încercat. Totodată, scopul acestor încercări a inclus și construirea unor modele matematice pe baza rezultatelor măsurărilor, încât să fie ușor de observat influența parametrilor de interes asupra proprietăților vizate. În cadrul capitolului s-au realizat și diagrame pe baza modelelor matematice obținute, ca prin reprezentările grafice, observațiile și concluziile cu privire la proprietățile cercetate să conțină și partea vizuală, ce prezintă dependența dintre factorii de intrare în proces și parametrii de ieșire, cu evidențierea evoluției acestei dependențe.

Mai departe, în cadrul capitolului al 6-lea, în partea de concluzii sunt evidențiate observațiile din urma tuturor cercetărilor realizate, plecând de la documentarea teoretică a ceea ce au realizat alți cercetători în domeniul procesului de tipărire 3D, continuând cu conturarea premiselor teoretice de cercetare și încheind cu observațiile din cercetările experimentale. Totodată, sunt subliniate contribuțiile personale prin intermediul acestei teze asupra procesului de tipărire 3D, în corelație cu tema tezei de doctorat aleasă. Nu în ultimul rând, sunt exemplificate și câteva direcții viitoare, pentru continuarea cercetărilor, deoarece investigațiile realizate au deschis perspective mai detaliate și pentru cercetări ulterioare.

Doresc acum să prezint mulțumiri cadrelor didactice din cadrul Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, care mi-au acordat sprijin și de a căror colaborare am beneficiat în efectuarea cercetărilor și în elaborarea tezei de doctorat. Dintre aceste cadre didactice, mulțumiri deosebite doresc să adresez domnului profesor universitar doctor inginer Laurențiu Slătineanu, conducătorul de doctorat al subsemnatei, căruia îi datorez mulțumiri pentru sprijin și suport în cercetările realizate, și, totodată, unor cadre didactice dintre care voi menționa pe domnul profesor universitar doctor inginer Gheorghe Nagiț, pe doamna profesor universitar doctor inginer Oana Dodun, pe doamna conferențiar universitar doctor inginer Margareta Coteață, inclusiv în calitatea dumnealor de membri ai comisiei de îndrumare din universitate și, de asemenea, pe domnul șef de lucrări doctor inginer Andrei Marius Mihalache, cu deosebire pentru sprijinul în realizarea simulărilor unor aspecte derivate din cercetările efectuate. Totodată, se cuvine să menționez și să aduc mulțumiri și domnului profesor universitar doctor inginer Alexandru Șover și unor studenți doctoranzi cu care am colaborat în efectuarea unora dintre cercetările referitoare la procesele de tipărire 3D și din partea cărora am beneficiat de ajutor și de sugestii pentru rezolvarea unor varii probleme. Aș dori să prezint mulțumiri și domnilor maiștri din cadrul facultății, pentru sprijinul acordat în materializarea unor dispozitive solicitate de desfășurarea cercetărilor experimentale. Mai mult, aș dori să mulțumesc și părinților mei pentru tot sprijinul emoțional oferit de-a lungul anilor, pentru toată încurajarea și toate sacrificiile făcute pentru mine, precum și tuturor colegilor, profesorilor, prietenilor și, nu în ultimul rând, soțului meu, care m-au sprijinit în tot acest periplu și toată această oportunitate academică, punând fiecare câte o cărămidă la formarea mea și sprijinindu-mi pașii la nevoie.

Ing. Adelina Hrițuc

Capitolul 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR din DOMENIUL FABRICAȚIEI ADITIVE PRIN TIPĂRIRE 3D

Ultimele decenii au evidențiat desfășurarea unei reale revoluții în ceea ce privește tehnologiile de fabricație, în special datorită apariției și dezvoltării rapide a *fabricației aditive*. Conceptul de fabricație aditivă constituie o traducere a conceptului din limba engleză a „additive manufacturing”.

În prezent, conceptul de fabricație aditivă se referă la un proces prin care este generat un obiect prin construirea lui strat cu strat. O asemenea semnificație se află în opoziție cu cea a conceptului de *fabricație substractivă*, în cazul căreia obiectul este generat prin îndepărtarea de material dintr-un semifabricat solid, până în momentul în care obiectul este definitivat (Ce este, 2023; Linke, 2017; Puterea, 2024).

În general, atunci când se face o trimitere la fabricația aditivă, se are în vedere conceptul de tipărire 3D, dar tipărirea 3D este doar una dintre modalitățile de materializare a fabricației aditive, după cum tipărirea 3D se poate realiza în variante semnificativ diferite, implicând parametri și condiții foarte diferite, care pot influența atât calitatea pieselor obținute, cât și utilizările ulterioare ale acestora. Indiferent de modalitatea în care materialele sunt aduse de la forma de material brut/semifabricat la forma finală a piesei, se poate considera că procedeele de fabricație aditivă au modificat semnificativ industriile și procesele de prelucrare, concurând în multe direcții cu modalitățile, așa-numite, clasice de fabricație.

Inginerul american Charles Hull, co-fondator al companiei 3D Systems Corporation, preluând bazele activităților din domeniul fabricației aditive, a realizat realmente prima piesă 3D, în anul 1983 (fig. 1.1), așa cum se precizează chiar în informațiile existente pe pagina web a companiei 3D Systems (Systems, 2018). Ulterior, Hull depunea prima cerere de brevet de invenție referitoare la tipărirea 3D, în anul 1984. Cererea de brevet se referea la ceea ce este cunoscut în prezent ca un procedeu de stereolitografie (SLA), acest pas fiind considerat crucial în adoptarea ulterioară pe scară largă a procedeelor de tipărire 3D (Raise, 2022). Brevetul nr. US4575330 obținut de către Hull în 1986 considera stereolitografia ca o metodă ce utiliza un aparat cu ajutorul căruia devenea posibilă fabricarea unui obiect solid prin tipărirea succesivă de straturi subțiri de material. Depunerea straturilor se efectua unul peste celălalt, aceste straturi urmând să se solidifice sub acțiunea unei radiații ultraviolete (UV) la care este obiectul expus după tipărire (Norman, 2016).

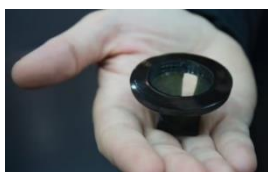


Fig. 1.1. Prima piesă obținută prin tipărire 3D în anul 1983 (Systems, 2018)

realizată prin tipărire 3D.

În afara metodologiei efective referitoare la utilizarea procesului de fabricație atunci când se realizează piese tipărite 3D, este necesar să fie luate în considerare unele detalii tehnice ale utilizării piesei, ce țin de forțele, eforturile, tensiunile, deformațiile sau de condițiile de montare și utilizare efectivă a viitoarei piese. Astfel, pot fi menționate câteva aspecte ce îl pot ghida pe proiectant în elaborarea procesului de fabricație:

- Aspecte ce țin de montarea piesei în ansamblul din care va face parte;
- Aspecte ce țin de eforturile la care piesa va fi supusă în exploatare;
- Aspecte ce țin de estetica piesei;
- Aspecte ce țin de deformațiile susceptibile să apară în timpul procesului de fabricație;
- Aspecte ce țin de optimizarea procesului de fabricație;
- Aspecte ce țin de legile fizicii.

Există reglementări la nivel de standarde ce definesc terminologia, metodologia și diferențele între metodele de tipărire 3D. Au fost stabilite astfel 7 metode de bază pentru fabricația aditivă (ISO/ ASTM 52900 - 2015, cu o variantă actualizată în 2021 (ISO/ASTM 52900:2021(en), 2021). Zhang a propus o clasificare a metodelor de fabricație aditivă prin luarea în considerare a materiei prime folosite; el a apreciat că există metode ce utilizează filamente, avansarea unor pulberi, dispersarea unor pulberi (pulverizare) (Zhang, 2023). La clasificarea metodelor aditive de fabricație, Gawel a luat în considerare starea materiei prime folosite, identificând 3 categorii de asemenea stări: materiale solide, materiale lichide, pulberi (Gawel, 2020). El apreciază, de altfel, că în anul 2020 puteau fi menționate următoarele metode de fabricație aditivă: modelarea prin depunere de material topit (în limba engleză, *Fused Deposition Modeling, FDM*), stereolitografia (*Stereolithography/Stereolithography Apparatus, SL/SLA*), procesarea digitală cu lumină (*Digital Light Processing, DLO*), tipărirea cu jet (*PolyJet, MultiJet Modeling, MJM, MultiJet Printing, MJP*), fabricarea de

obiecte laminate (*Laminated Object Manufacturing, LOM*), litografierea axială computerizată (*Computed Axial Lithography, CAL*), metode ce folosesc laserul (*Selective Laser Sintering, SLS; Selective Laser Melting, SLM; Direct Metal Laser Sintering, DMLS; Direct Metal Printing, DMP; Direct Laser Melting, DML*), topirea cu fascicul de electroni (*Electron Beam Melting, EBM*), metode cu jet de liant (*Color Jet Printing, CJP; Three Dimensional Printing, 3DP*), modelarea folosind o rețea proiectată cu ajutorul laserului (*Laser Engineered Net Shaping, LENS*), depunerea metalică cu ajutorul laserului (*Laser Metal Deposition, LMD*), fabricarea ceramicilor bazată pe litografie (*Lithography-based Ceramics Manufacturing, LCM*), fabricarea prin extrudare a unor forme înghețate (*Freeze-form Extrusion Fabrication, FEF*) (Gaweł, 2020). Să observăm că pentru unele dintre aceste metode, îndeosebi pentru acele metode mai puțin utilizate, nu s-a încetățenit încă utilizarea unor concepte adecvate în limba română. Rasiya et al. (2021) consideră că în grupa metodelor aditive de fabricație poate fi încă inclusă fabricarea aditivă cu arc și sârmă (*Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM*). Selectarea, în vederea aplicării uneia dintre metodele de fabricație aditivă menționate anterior poate fi efectuată pe baza unor activități de stabilire a unei decizii prin analiză multicriterială (Falkonakis et al., 2024). Un glosar corespunzător pentru denumirile specifice și abrevierile ce țin de tipărirea 3D poate fi consultat și pe website-ul celor de la PADT (PADT, 2022).

Existența și importanța reglementărilor în domeniul fabricației aditive pot fi evidențiate inclusiv printr-un standard promovat de către Organizația Internațională de Standardizare (ISO) chiar în anul 2023 (este vorba despre standardul ISO/ASTM 52927: 2024 *Additive Manufacturing – General principles – Main characteristics and corresponding test methods*).

Pentru o înțelegere mai operativă a principalelor metode de tipărire 3D utilizate în prezent, în continuare vor fi evidențiate câteva aspecte specifice lor, plecând de la o descriere succintă, evidențiindu-se principiul de funcționare, avantajele și utilizările lor. Pe lângă metodele de tipărire 3D prezentate, în laboratoarele de cercetare și pe piață pot fi identificate încă alte câteva metode, însă utilizarea lor este mai limitată și condițiile de aplicare mai complexe, astfel încât prezentarea din acest subcapitol va fi focalizată doar pe cele mai la îndemână și mai utilizate metode (HP, 2022).

Tehnologia de tipărire 3D intitulată modelare prin extrudare (în limba engleză, *Fused Deposition Modeling, FDM*) este utilizată la scară largă pentru prototipare; ea constă în depunere de material topit, strat cu strat. Preferința pentru utilizarea acestei tehnologii se datorează în cea mai mare măsură simplității și accesibilității acesteia. Este aplicată pentru realizarea unor piese destinate a fi ulterior testate prin diferite metode, pentru diferite solicitări, dar și în aplicații ce țin de fabricarea unor piese cu destinații comune, în industrie, activități recreative, echipamente sportive etc. Aceasta va fi metoda cea mai folosită în cercetările experimentale din cadrul acestei teze de doctorat.

S-a realizat în acest capitol și un tabel de analiză comparativă între metodele de tipărire cele mai folosite în industrie și cercetare, evidențiindu-se elementele ce le recomandă pentru diferite aplicații.

În ceea ce privește parametrii care caracterizează procesul propriu-zis de tipărire 3D a unor piese prin metoda ce utilizează firul topit, este necesar să se precizeze de la început faptul că numărul acestor parametri (ai factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D) este foarte mare. În cadrul tezei sale de doctorat, Ermolai a expus unele detalii privind 13 grupe de asemenea parametri (Ermolai, 2023), aceste grupe fiind cele corespunzătoare unor aspecte geometrice definite prin formatul digital al viitoarei piese (grosimea stratului, grosimea peretelui exterior, grosimile pereților interiori etc.), modului de constituire a pereților (dimensiuni ale zonelor de tranziție de la zonele mai groase la zonele mai înguste, moduri de închidere a conturilor, grosimi minime ale pereților ce pot fi tipăriți etc.), caracteristici ale straturilor ce constituie învelișurile, parametri ce caracterizează modul în care materialul „umple” zonele ce definesc existența piesei (densitatea de umplere, modelul utilizat pentru umplere, modul de unire a liniilor de umplere etc.), parametrii care trebuie luați în considerare la stabilirea debitului de curgere a materialului, a temperaturii de extrudare și a temperaturii plăcii pe care are loc depunerea (temperaturi de extrudare, debitul de curgere pentru materializarea diferiților pereți etc.), parametri ce definesc cinematica deplasărilor (viteze și accelerații cu care au loc deplasările relative dintre ajutaj și masa echipamentului de tipărire, pentru completarea diferitelor zone ale viitoarei piese), parametri ce caracterizează etapa de solidificare a materialului depus (turații ale ventilatoarelor, viteza de tipărire pentru a se lăsa un timp suficient pentru solidificare), parametrii care definesc adeziunea materialului topit la placa ce constituie masa mobilă a echipamentului (modul de realizare a primei cantități de material depus, soluțiile alese pentru asigurarea unei aderențe minime a materialului depus la placa pe care are loc depunerea etc.), parametri specifici tipăririi cu ajutorul a două ajutaje, destinate depunerii a două materiale distincte (este vorba despre așa-numita extrudare duală, parametrii specifici fiind cei care iau în considerare generarea și dimensiunile blocurilor de tranziție, prevenirea unor depuneri nedorite etc.), parametri de ajustare a rețelei de pereți în curs de realizare (așa cum sunt cei referitori la modul de unire a unor volume suprapuse de material, modul de alternare a straturilor, rezoluție minimă și maximă de tipărire etc.), parametri ce apar în cazul unor modele speciale (de exemplu, cei care iau în considerare secvențierea procesului de tipărire specific matrițelor), parametri care se stabilesc prin acumularea unor informații specifice experimentale (cum sunt acei parametri care permit oprirea extrudării materialului înaintea închiderii unui contur, caracteristici ale acțiunii denumite *preretragere* etc.).

Întrucât unul dintre obiectivele cercetării doctorale se referă la investigarea măsurii în care piesele din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D asigură o comportare cât mai bună în exploatarea pieselor finite obținute, s-a apreciat ca fiind necesară o sumară examinare a ceea ce înseamnă proprietăți de interes din punctul de vedere al exploatării pieselor din asemenea materiale și cu precădere a acelor proprietăți ce puteau fi evaluate prin cercetarea experimentală avută în vedere în cadrul tezei.

S-a constatat astfel că există (van der Leeden și Frens, 2002; Mark et al., 2004; Fetecău, 2007; van Krevelen și te Nijenhuis, 2009; Sultanova et al., 2012; Fasake et al., 2021; Khaha și Soleimani, 2024); **proprietăți chimice, fizice, mecanice, tehnologice, de întreținere și reparare a pieselor în care au fost încorporate materialele plastice.**

Pentru a identifica într-o manieră mai amplă tendințele generale ale activităților de cercetare din domeniul metodelor și procedeelor de fabricare prin tipărire 3D, a pieselor din materiale plastice și pentru identificarea unor direcții multiple de cercetare privind proprietăți și parametri diferiți, ce sa fie dezvoltate apoi în cadrul acestei teze de doctorat, a fost efectuată o cercetare documentară în acest sens; câteva dintre rezultatele unor cercetări recente (cu precădere din ultimii zece ani) în domeniul investigării și aplicațiilor procedeelor de tipărire 3D, utilizând materiale plastice, sunt menționate succint în continuare.

Se observă o creștere a complexității procedeelor de fabricare prin tipărire 3D și urmărirea obținerii de noi beneficii din aplicarea lor. Numeroase aspecte referitoare la performanțele acestor procedee au fost îmbunătățite, inclusiv prin identificarea și utilizarea unor combinații optime posibile ale valorilor factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D. S-a acordat atenție largirii domeniilor de utilizare a materialelor plastice, unor aplicații mai eficiente a lor și mai convenabile, din punctul de vedere al protecției mediului.

Unor asemenea direcții de investigare științifică le-au fost dedicate eforturi ale cercetătorilor din universități, din instituții specializate de cercetare, din compartimentele de cercetare ale unor mari companii care desfășoară activități productive în domeniul maselor plastice.

Astfel, s-au identificat în cercetările existente modele matematice, reprezentări grafice elocvente și planificări experimentale ce oferă o imagine a influenței factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D asupra performanțelor pieselor obținute.

Concluzii la capitolul 1:

1. Una dintre metodele de fabricație care a cunoscut o dezvoltare semnificativă în ultimele decenii a fost fabricația aditivă, aceasta bazându-se pe generarea unei piese și uneori chiar a unor subansambluri printr-o depunere treptată de material;

2. Din punct de vedere practic, s-a constatat că fabricația aditivă poate fi materializată, la rândul ei, prin mai multe metode distincte, unele dintre acestea luând în considerare principii de lucru care presupun o adăugare de material strat cu strat, până la obținerea formei definitive a piesei;

3. Dezvoltarea metodei de lucru menționate anterior a devenit realizabilă numai atunci când s-a constatat că este posibilă elaborarea unor modele digitale care să permită definirea unor secțiuni multiple prin piesa de generat, o asemenea „feliere” a materialului piesei fiind permisă ca urmare a unor progrese semnificative în tehnologia informației și în utilizarea instrumentelor digitale de proiectare constructivă;

4. Există, în prezent, mai multe metode de generare „strat cu strat” a unei piese și existența unor similitudini între aceste metode, precum și plasarea acestora sub ideea de proces de tipărire a determinat în mod efectiv utilizarea denumirii de „tipărire 3D” pentru definirea grupului respectiv de metode;

5. Una dintre metodele de tipărire 3D ce a devenit foarte utilizată în ultimele două decenii este așa-numita metodă de fabricație cu filament topit, această metodă implicând topirea unui fir din materialul de depus și depunerea treptată a materialului topit în lungul unor traiectorii strict controlate între ajutorul în care este avansat și topit firul aflat inițial în stare solidă, prin duza de expulzare material și masa pe care are loc depunerea și generarea treptată, ca atare, a piesei de realizat;

6. Dezvoltarea unor procedee ce permiteau fabricarea de piese prin depunere de material dintr-un filament topit a condus la observația că un ansamblu de proprietăți fizico-mecanice ale materialului piesei puteau fi modificate cu relativă ușurință chiar în timpul procesului de fabricație, prin utilizarea adecvată a unor factori capabili să exercite influență asupra rezultatelor procesului de tipărire 3D;

7. A fost sesizat faptul că o categorie de materiale care pot fi utilizate cu succes la fabricarea aditivă de piese prin tipărire 3D o constituie materialele plastice, care, încălzite la anumită temperatură, făceau posibilă materializarea unor procedee de tipărire 3D în vederea obținerii unor piese caracterizate uneori prin forme și geometrii complicate;

8. Caracterizate cel puțin în parte printr-o productivitate mai redusă, procedeele de tipărire 3D au fost aplicate inițial pentru fabricația de prototipuri, în fabricația de piese unicat sau de serie mică. Treptat, prin dezvoltarea unor echipamente de fabricație adecvate, au fost asigurate condiții de mărire a productivității proceselor de fabricație, fiind îndeplinite, în acest mod, condițiile utilizării tipăririi 3D inclusiv pentru fabricația în serie mijlocie sau chiar în serie mare;

9. S-a constatat, pe de altă parte, că unele proprietăți de exploatare a pieselor fabricate prin procedee de tipărire 3D pot fi modificate în sensul dorit de fabricant prin modificarea anumitor proprietăți fizico-mecanice ale materialelor din piesele tipărite 3D și o asemenea direcție a constituit o preocupare importantă a cercetătorilor și a specialiștilor din domeniul construcției de mașini;

10. Interesul acordat unor aspecte în concordanță cu cele menționate anterior a determinat inițierea și dezvoltarea unor cercetări ample deja, orientate spre ameliorarea proprietăților de exploatare ale pieselor fabricate prin tipărire 3D, acționându-se asupra factorilor ce definesc condițiile de tipărire 3D. Acest subiect este amintit în partea de analiză a cercetărilor deja existente, în vederea identificării factorilor de interes și proprietăților de exploatare care să fie analizate cu investigații ulterioare;

11. S-a constatat că numărul factorilor capabili să exercite influență asupra proprietăților fizico-mecanice ale materialelor încorporate în piesele fabricate prin procedee de tipărire 3D și deci asupra proprietăților de exploatare ale materialelor respectivelor piese este foarte mare, și, din acest motiv, este necesar să se efectueze o selecție adecvată a acelor factori ale căror valori pot fi modificate acționându-se asupra valorilor factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D;

12. Examinarea literaturii de specialitate accesibile și referitoare la modul în care se poate acționa asupra proprietăților de exploatare ale pieselor din materialele plastice fabricate prin tipărire 3D a permis identificarea unor tendințe actuale ale cercetărilor științifice în domeniul menționat.

Capitolul 2

OBIECTIVE ALE CERCETĂRILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR FACTORI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE

Cercetarea științifică este o activitate care vizează colectarea, interpretarea și evaluarea sistematică a datelor, într-o manieră planificată și care contribuie astfel la acumularea de noi informații despre natură, societate și gândire. Cercetarea științifică este importantă datorită contribuției sale esențiale la dezvoltarea societății umane din punct de vedere economic, cultural, spiritual etc.

Procesul de tipărire 3D, prin totalitatea avantajelor și oportunităților de fabricație pe care le prezintă, oferă direcții de cercetare multiple, referitoare la diversele aspecte tehnologice sau la domeniile de utilizare ale unei astfel de metode de fabricație. Cercetarea documentară efectuată și ale cărei rezultate au fost prezentate sintetic în capitolul întâi al prezentei teze de doctorat a permis mai întâi acumularea unor informații sistematice privind procesul de fabricare a pieselor din materiale plastice prin tipărire 3D, și, ulterior, identificarea unor direcții de cercetare în care au fost investite, anterior, eforturi importante și care urmăreau îmbunătățirea tehnologiilor de tipărire 3D și respectiv a rezultatelor utilizării în diferite aplicații a unor asemenea tehnologii.

Obiectivul principal al cercetărilor finalizate prin prezenta teză de doctorat a vizat evidențierea influenței exercitate de către anumiți factori ai procesului de tipărire 3D asupra unor proprietăți de exploatare ale pieselor din materiale plastice.

În cadrul tezei de doctorat, se va încerca să se acopere încă o serie de **obiective specifice**, derivate din obiectivul principal menționat anterior.

Principalele asemenea obiective specifice sunt menționate succint în continuare.

În calitate de **obiective ale activității de cercetare documentară**, s-a urmărit:

1. Efectuarea unor activități de cercetare documentară privind procesul de tipărire 3D, pentru cunoașterea mai amănunțită și caracterizare ale aspectelor ce definesc situația actuală a informațiilor științifice și tehnice despre un asemenea proces, pentru relevarea importanței procesului în cauză, pentru obținerea unei imagini generale privind interesul acordat acestui proces de către cercetătorii din țară și de peste hotare;
2. Identificarea acelor aspecte de natură să contribuie la definirea direcțiilor actuale de cercetare și de aplicare a procesului de tipărire 3D, în cazul pieselor obținute din materiale plastice;
3. Mai buna cunoaștere și înțelegere a fenomenelor și proceselor care se află la baza metodelor de fabricație aditivă în general și a metodelor de tipărire 3D în particular;
4. Analizarea modurilor în care procesul de tipărire 3D poate fi materializat, a tipurilor de materiale plastice posibil a fi folosite și a caracteristicilor unor metode de tipărire 3D, în vederea identificării unor posibilități de îmbunătățire a procesului sau a acelor intervale de variație a valorilor factorilor de intrare care vor conduce la îmbunătățirea performanțelor de utilizare a procesului de tipărire 3D și a calității pieselor obținute prin utilizarea acestui proces;
5. Identificarea structurii echipamentelor și a materialelor necesare pentru materializarea proceselor de fabricație prin tipărire 3D, inclusiv pentru a putea compara, din diferite puncte de vedere, aceste echipamente și materiale cu cele folosite în cazul tehnologiilor, așa-numite, clasice de fabricație;

6. Caracterizarea procesului de tipărire 3D, a pieselor din materiale plastice din punctul de vedere al parametrilor de performanță specifici ai acestui proces și, respectiv, a factorilor a căror variație poate exercita influența asupra valorilor parametrilor de ieșire din proces;

7. Acumularea și sistematizarea informațiilor referitoare la factorii care pot acționa în cadrul procesului de tipărire 3D, a pieselor din materiale plastice și, respectiv, la modul în care acești factori pot afecta valorile unor parametri de interes ai metodei de fabricație investigate;

8. Obținerea unor informații sistematice asupra aspectelor ce caracterizează în prezent metodele de tipărire 3D și respectiv asupra situației actuale a informațiilor științifice și tehnice referitoare la acest proces;

9. Cunoașterea a ceea ce s-a realizat în domeniul de interes de către cercetătorii din România și de pe plan mondial, inclusiv pentru identificarea unor aspecte care nu au fost cercetate sau au fost mai puțin investigate, ca pe baza acestora să se contureze direcțiile inovative capabile a fi acoperite prin intermediul acestei teze de doctorat;

Principalele *obiective ale cercetării teoretice*, în concordanță cu obiectivul general al cercetării tezei doctorale sunt următoarele:

10. Selectarea unei metode de tipărire 3D a pieselor din materiale plastice pentru care ar putea exista condiții materiale de dezvoltare ulterioară a unor cercetări experimentale orientate spre relevarea unor noi aspecte corespunzătoare metodei de tipărire selectate;

11. Aplicarea metodei analizei sistemice în cazul metodei de tipărire 3D selectate, pentru clarificarea indicatorilor de performanță ai acestui proces (a parametrilor de ieșire din proces sau a variabilelor independente ale procesului), a factorilor care exercită influență asupra performanțelor procesului și a eventualelor corelații între factorii de intrare și parametrii de ieșire ai procesului;

12. Utilizarea metodei diagramei Ishikawa pentru o relevare mai clară și o expunere mai sistematizată a factorilor și grupelor de factori capabili să afecteze valorile parametrilor de ieșire ai procesului de tipărire 3D, pentru piesele obținute din materiale plastice;

13. Identificarea și utilizarea unor metode de gândire creativă, care să permită generarea de idei inovative privind posibilitățile de dezvoltare a unor cercetări teoretice și experimentale referitoare la procesul de tipărire 3D a pieselor din materiale plastice. Se intenționează, în acest fel, utilizarea metodei diagramei de idei în vederea găsirii unor posibile combinații de parametri, pentru soluții de completare/inovare a echipamentelor utilizabile ulterior pentru asigurarea condițiilor de tipărire 3D sau pentru o îmbunătățire a proprietăților pieselor din materialele plastice utilizate în tipărirea 3D;

14. Aplicarea unor principii specifice utilizării metodei proiectării axiomatice în acțiunile de analizare sau concepere a unor noi dispozitive sau aparate utilizabile pentru cercetarea influenței diferiților factori de intrare în procesul de tipărire 3D asupra proprietăților de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărirea 3D;

15. Aplicarea analizei prin metoda elementului finit pentru o analizare mai detaliată a unor aspecte specifice procesului de tipărire 3D și care ar permite, de exemplu, în mod teoretic, o relevare a valorilor și distribuției deformațiilor și tensiunilor interne din piesele fabricate prin tipărire 3D din materiale plastice, utilizând în acest scop un procedeu selectat anterior și cu marele avantaj al observării facile și rapide a unor rezultate, fără a deține piesele efective și fără a fi testate;

Obiectivele specifice care urmăresc caracterizarea și îmbunătățirea prin inovare a bazei materiale posibil a fi utilizate în dezvoltarea unor cercetări experimentale sunt:

16. Identificarea și analiza disponibilităților materiale existente, adică a echipamentelor și aparatelor din dotarea Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini al Facultății de Construcții de Mașini și Management Industrial din Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, urmărindu-se selectarea, cunoașterea și caracterizarea acelor echipamente și aparate susceptibile de utilizare în cadrul cercetărilor experimentale;

17. Plecând de la direcțiile de cercetare identificate și urmărind îmbunătățirea condițiilor de efectuare a cercetărilor experimentale, achiziționarea unor aparate și materiale, în vederea asigurării unor condiții optime de realizare a cercetărilor experimentale, privind influența și intensitatea influenței exercitate de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra anumitor proprietăți de exploatare ale pieselor fabricate prin tipărire 3D din materiale plastice;

18. Conceperea și realizarea practică a unor soluții constructive noi sau îmbunătățite de aparate și dispozitive utilizabile pentru caracterizarea comportării materialelor plastice din piesele sau epruvetele fabricate prin tipărire 3D, sub acțiunea diferitelor categorii de solicitări;

19. Identificarea și analiza unor modalități de lărgire a posibilităților de utilizare a unora dintre aparatele și dispozitivele existente în dotarea laboratorului sau în alte structuri de cercetare din universitate, pentru mai buna folosire a lor în cadrul diferitelor activități de cercetare experimentală în legătură cu tema tezei de doctorat, de îmbunătățire/ modificare/ adaptare a unor echipamente existente în cadrul departamentului, în vederea utilizării acestor echipamente în cadrul cercetărilor propuse, sau chiar identificarea unor soluții constructive noi sau îmbunătățite, pentru anumite echipamente necesare dezvoltării cercetărilor experimentale propuse;

20. Identificarea unor programe specializate de calculator susceptibile a putea fi folosite în cadrul cercetărilor teoretice și experimentale în legătură cu tema tezei de doctorat;

Obiectivele specifice corespunzătoare dezvoltării unor cercetări experimentale orientate spre relevarea influenței și a intensității influenței exercitate de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra valorilor unor parametri de ieșire din acest proces sunt următoarele:

21. Aplicarea cercetării experimentale în vederea confirmării sau infirmării unor ipoteze formulate în cadrul cercetărilor teoretice referitoare la afectarea, impactarea de către variația valorilor factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D a valorilor corespunzătoare unor proprietăți de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D;

22. Verificarea măsurii în care rezultatele utilizării metodei analizei cu elemente finite sunt concordante cu rezultatele experimentale obținute în direcții de interes, din punctul de vedere al cercetării propuse;

23. Identificarea unor metode care să permită dezvoltarea unor cercetări experimentale sistematice vizând influența exercitată de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra valorilor ce definesc unele dintre proprietățile de exploatare ale pieselor fabricate prin tipărire 3D;

24. Utilizarea unor metode de planificare ale încercărilor experimentale, astfel încât să se asigure obținerea unui nivel de încredere cel puțin acceptabil al rezultatelor experimentale, iar cercetările experimentale să poată fi efectuate în intervalul de timp prevăzut pentru aceste încercări;

25. Utilizarea metodei Taguchi în vederea planificării încercărilor experimentale, aceasta urmând să permită o anumită optimizare a numărului de experimente necesare, fără însă a fi afectat nivelul de încredere al rezultatelor ce urmează a fi obținute;

26. Aplicarea metodei celor mai mici pătrate în vederea prelucrării rezultatelor obținute prin încercările experimentale și determinarea unor modele matematice empirice care să evidențieze direcția de acțiune și intensitatea influenței exercitate de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D, asupra valorilor unor mărimi ce caracterizează proprietățile de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D;

27. Utilizarea unor programe specializate de calculator care să permită efectuarea operativă a calculelor necesare, pentru identificarea modelelor matematice empirice și a indicilor care permit evaluarea preciziei unor asemenea modele matematice empirice;

28. Elaborarea unor reprezentări grafice, plecând de la rezultatele experimentale sau de la modelele matematice empirice determinate, modele care să permită ilustrarea grafică și relevarea argumentată a influenței exercitate de către factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra valorilor parametrilor de ieșire din acest proces;

29. Pe baza rezultatelor obținute inclusiv prin aplicarea unor metode de cercetare teoretică și experimentală, formularea unor observații generale și respectiv a unor recomandări referitoare la circumstanțele în care devine realizabilă îmbunătățirea comportării în exploatare a pieselor fabricate prin tipărire 3D din materiale plastice, cu luarea în considerare a posibilităților de a se acționa în acest sens asupra factorilor de intrare în procesul investigat.

Totodată, după ce aceste direcții de cercetare îndeplinite sunt prezentate, conținutul tezei este continuat cu partea de contribuții personale, concluzii cu privire la totalitatea activităților de cercetare întreprinse, precum și posibilele direcții viitoare de cercetare, plecând de la rezultatele obținute în cadrul tezei.

Concluzii la capitolul al 2-lea:

1. În cadrul acestui capitol s-au conturat direcțiile de cercetare teoretică și experimentală pe baza cărora se vor conduce toate activitățile din cadrul programului tezei de doctorat, cu privire la procesul de tipărire 3D a pieselor realizate din materiale plastice.

2. Prin obiectivele de cercetare documentară și cercetare teoretică, enumerate anterior, s-au evidențiat elemente ce țin de descrierea procesului de tipărire 3D, de cercetările deja existente, de rezultatele optimizărilor deja realizate de către alți cercetători, iar prin evidențierea direcțiilor de cercetare experimentală se poate estima o planificare a activităților necesare pentru acoperirea cercetărilor dorite.

3. S-a realizat identificarea elementelor și tehnicilor importante ce vor fi utilizate în partea de cercetare teoretică, în vederea identificării parametrilor, factorilor de intrare în proces, pentru ca optimizările asupra proprietăților de exploatare vizate să fie elocvente și în legătură cu tema tezei de doctorat propuse.

4. În partea de bază materială s-au identificat modulele în care necesitățile de echipamente și materie primă, în vederea realizării cercetării experimentale, vor fi prezentate. Acest lucru presupune trecerea în revistă a activităților ce se doresc a fi realizate și analizarea echipamentelor și dispozitivelor existente, ca cele necesare să fie achiziționate.

5. Pentru partea de cercetare experimentală s-au identificat pașii algoritmului după care vor fi aplicate cercetările ce vor fi întreprinse, subliniindu-se totodată elementele importante ce reies din aceste investigații, cum ar fi modelele matematice, reprezentările grafice sau evidențierea specifică a factorilor de impact și rolul acestora în proprietățile de exploatare.

Capitolul 3

CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE

Analiza sistemică aplicată procesului de tipărire 3D a relevat faptul că acesta este un proces complex, cu un număr mare de factori de intrare în proces, cu existența unor interacțiuni complexe în interiorul procesului, cu posibile efecte negative ca urmare a acțiunii unor factori perturbatori, cu necesități de urmărire și evaluare a mai multor parametri de ieșire etc.

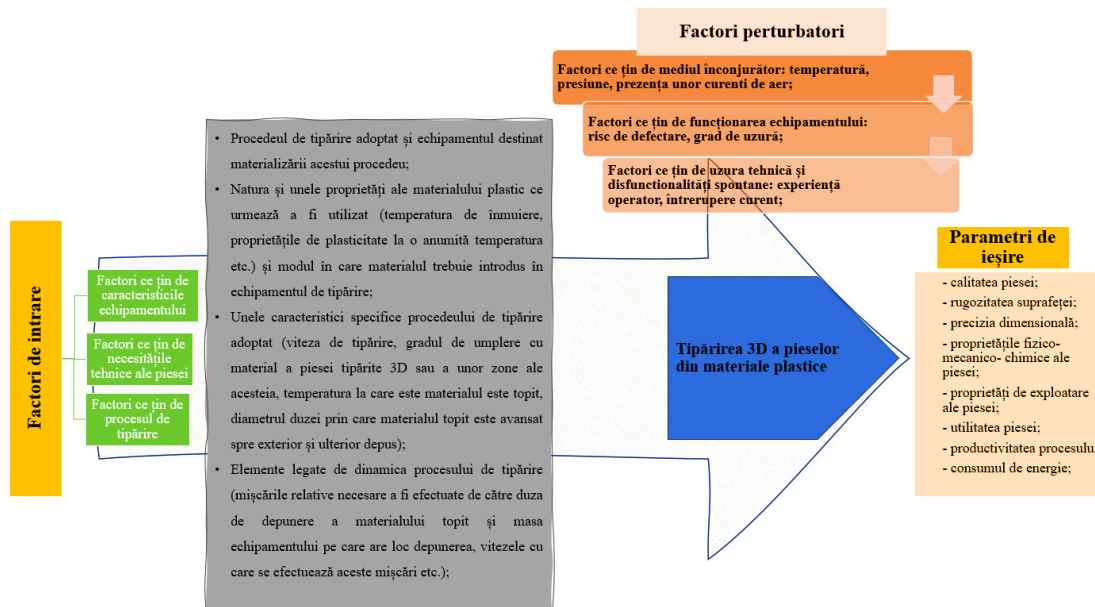


Fig. 3.1. Reprezentare grafică aferentă analizei sistemice a procesului de tipărire 3D în cazul unor piese din materiale plastice

Utilizarea metodei Ishikawa în cazul tipăririi 3D

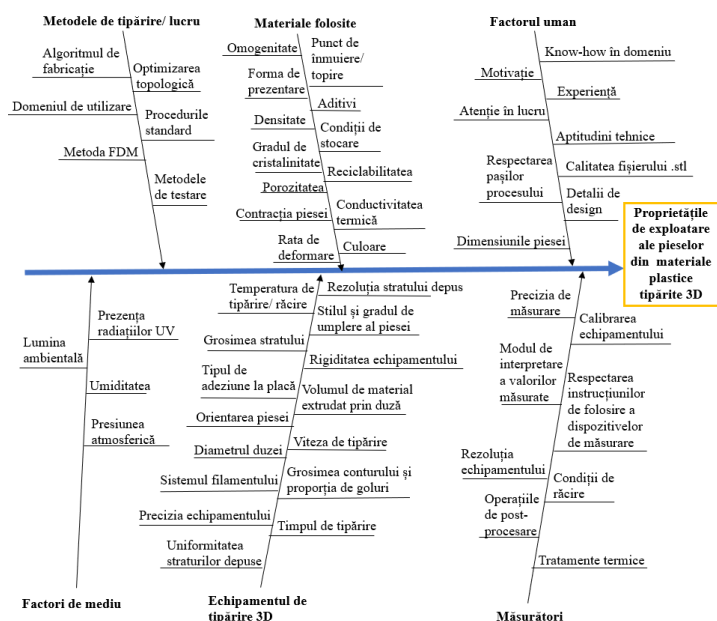


Fig. 3.2. Utilizarea metodei diagramei Ishikawa pentru evidențierea factorilor și grupelor de factori capabili să afecteze proprietățile de exploatare ale pieselor din materiale plastice tipărite 3D

A fost elaborată **diagrama Ishikawa** prezentată în fig. 3.2. Analiza informațiilor sistematizate sub forma acestei diagrame oferă o imagine destul de sugestivă asupra posibilităților de a se acționa asupra unor factori de intrare în procesul de tipărire, astfel încât să devină posibilă o îmbunătățire a proprietăților de exploatare ale pieselor realizate prin tipărire 3D din materiale plastice, atunci când se are în vedere utilizarea metodei de fabricație aditivă cu filament topit.

Utilizarea metodei diagramei de idei, aplicată în cazul tipăririi 3D

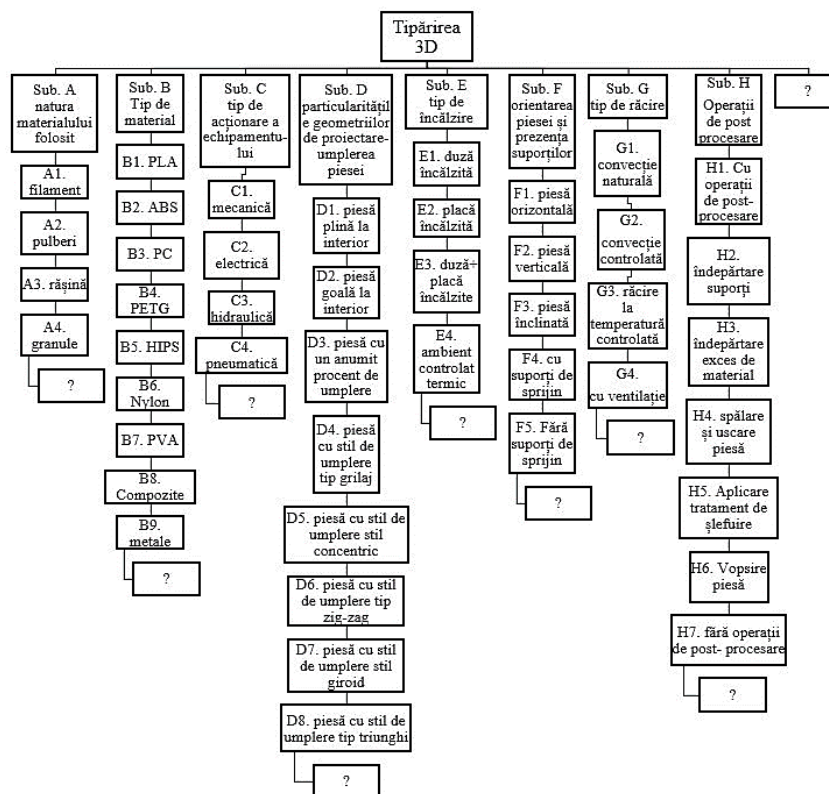


Fig. 3.3. Diagrama de idei aplicată pentru procesul de tipărire 3D în cazul pieselor din materiale plastice

Încercarea de a aplica **metoda diagramei de idei** în cazul necesității de identificare a noi modalități de efectuare a cercetărilor referitoare la influența diferiților factori asupra proprietăților de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D a condus la reprezentarea grafică din fig. 3.3.

Utilizarea analizei SWOT în cazul tipăririi 3D

Se poate concluziona că potențialul procesului de tipărire 3D a pieselor din materiale plastice este mult superior riscurilor de fabricație evidențiate în prezent pentru procesul supus investigației. Există, desigur, și o serie de riscuri legate de efecte mai puțin sesizabile în prezent ale acțiunilor de limitare a utilizării materialelor plastice,

Puncte tari - Creșterea flexibilității în proiectare; - Asamblările complexe sunt reduse, putând obține direct ansambluri din tipărire; - Reducerea pierderilor cu materialele de fabricație; - Scurtarea lanțului de achiziționare pentru obținerea unei piese; - Scoaterea echipamentelor speciale pentru fabricație; - Îmbunătățirea costurilor asociate cu mâna de lucru; - Ușurința intrării pe piață;	Puncte slabe - Materialele sunt limitate; - Condițiile de mediu afectează calitatea materialelor; - Întreruperea bruscă a alimentării strică piesa; - Costurile per prototip; - Viteza de realizare și volumurile limitate; - Rezistența pieselor obținute; - Utilizările pe piață ale pieselor tipărite; - Control slab asupra echipamentelor de tipărire;
Oportunități - Producerea pieselor care pot fi personalizate; - Încurajarea firmelor mici pentru fabricație; - Îmbunătățirea testelor la produse; - Crearea de noi locuri de muncă; - Încurajarea proceselor de producție; - Micșorarea efortului de producție; - Creșterea inovației;	Amenințări - Drepturi de proprietate și drepturi de utilizare; - Limitările utilizatorului în folosirea produselor tipărite; - Poluarea cu materiale plastice; - Reciclabilitatea; - Tipărire în fluxuri prea mari/ necontrolate; - Pierderea locurilor de muncă/ a operatorilor prin automatizarea și reducerea procedeele clasice de prelucrare manuală;

Fig. 3.4. Rezultate ale unei analize SWOT ce vizează analiza procesului de tipărire 3D

cel puțin în unele domenii, în care a fost remarcată manifestarea unor efecte negative ale unei folosiri extinse a materialelor plastice.

Utilizarea proiectării axiomatică în cazul cercetării proceselor și echipamentelor utilizate pentru tipărirea 3D

Proiectarea axiomatică este o metodologie de proiectare propusă în anii '70 ai secolului anterior și utilizarea ei urmărește obținerea unei mai bune sistematizări și utilizări a operațiilor implicate, în principiu, în proiectarea unor procese și a diferitelor categorii de echipamente, dar s-a constatat că domeniile în care aplicarea proiectării axiomatică se poate dovedi benefică sunt mult mai largi decât cele menționate anterior (Dodun et al., 2022; Suh, 1990; Suh, 2001).

Tabel 3.1. Matricea care conține cerințele funcționale și parametrii de proiectare în cazul unui echipament folosit pentru investigarea capacității de izolare fonică a panourilor realizate din materiale plastice prin tipărire 3D

1	Parametri de proiectare	PP0: Echipament pentru investigarea capacității de izolare fonică a panourilor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D									
2		PP1: Mini boxa audio	PP2: Receptor de semnal audio	PP3: Piesa din material plastic sub formă de panou	PP4: Subsistem cu pârghii și elemente elastice	PP5: Subsistem pentru orientarea și fixarea mini boxei	PP6: Subsistem pentru orientarea și fixarea receptorului de semnal audio	PP7: Carcasa sub formă de cutie	PP8: Material lemnos pentru cutie		
Cerințe funcționale											
Col. 2 1	3	5	6	7	8	9	10	11	12		
4	Cerința funcțională de ordin 0	Cerințe funcționale de ordin 1		Evidențierea parametrilor de proiectare care corespund fiecăreia dintre cerințele funcționale evidențiate							
5	CF0: Echipament care permite evaluarea capacității de izolare fonică a panourilor din materiale plastice obținute prin tipărire 3D	CF1: Asigurați existența unei surse generatoare de semnale sonore cu caracteristici diferite	X						X		
6		CF2: Asigurați existența unui receptor al semnalului sonor, care sa permită și determinarea valorilor și analiza unor caracteristici ale semnalului sonor		X					X		
7		CF3: Asigurați existența epruvetelor din materialele a căror capacitate de izolare fonică urmează a fi investigată			X				X		
8		CF4: Asigurați existența unui subsistem de orientare și fixare a epruvetelor				X			X		
9		CF5: Asigurați existența unui subsistem de orientare și fixare a sursei generatoare de semnal sonor					X		X		
10		CF6: Asigurați existența unui subsistem pentru orientarea și fixarea receptorului de semnal audio						X	X		
11		CF7: Asigurați existența unei incinte în care să poată fi introduse epruveta, generatorul și receptorul semnalului sonor							X		
12		CF8: Asigurați posibilitățile minime de izolare fonică a echipamentului în raport cu mediul exterior și respectiv evitarea captării de către receptor a unor semnale sonore reflectate							X	X	

Prin dezvoltarea unei analize a diferitelor alternative de materializare a diferitelor componente ale echipamentelor pentru investigarea capacității de izolare fonică a panourilor de mici dimensiuni fabricate prin tipărire 3D din materiale polimerice, a fost conturată treptat soluția prezentată schematic în fig. 3.5.

Urmând același algoritm prezentat, și prin aplicarea principiilor de proiectare axiomatică, s-au materializat echipamente folosite pentru studiul rezistenței la abraziune, evaluarea mărimii forței de frecare, analiza evoluției transferului termic într-o piesă din material plastic tipărită 3D.

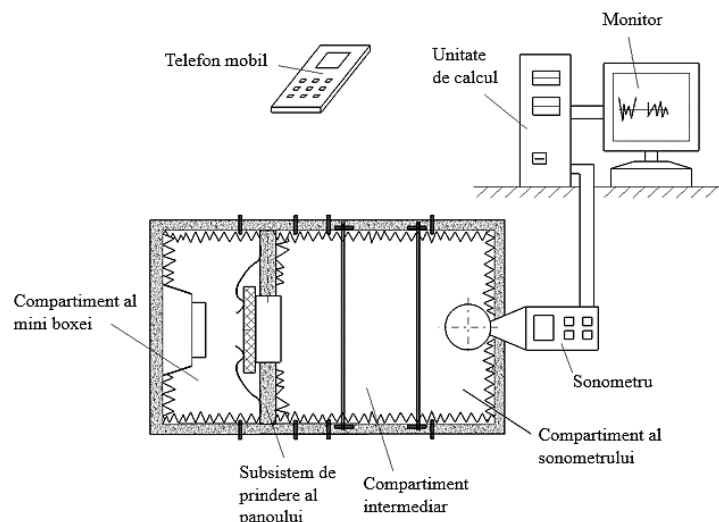


Fig. 3.5. Reprezentare schematică a echipamentului propus pentru evaluarea capacității de izolare fonică a unor panouri din material plastic tipărite 3D

Utilizarea metodei de analiză cu elemente finite pentru modelarea unor procese și caracteristici specifice tipăririi 3D

Modelarea cu ajutorul metodei cu elemente finite asigură condiții pentru formularea unor ipoteze referitoare la comportarea pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D, atunci când aceste piese sunt supuse diferitelor solicitări exterioare; dezvoltarea unor cercetări într-o asemenea direcție permite obținerea unor informații care să simuleze comportarea pieselor în timp și ca urmare a solicitărilor diverse la care sunt supuse, și, în acest fel, se ajunge la rezultate care, desigur, ulterior, ar putea fi verificate prin teste experimentale.

Este de remarcat faptul că metoda de analiză cu elemente finite poate fi destul de precisă, fiind de interes atât din punct de vedere științific, cât și al practicii industriale, când se recurge la simularea diferitelor situații reale de solicitare a pieselor din punct de vedere mecanic, termic etc.

În cazul cercetărilor ale căror rezultate au fost incluse în prezenta teză de doctorat, modelarea cu elemente finite a fost utilizată pentru obținerea unor informații suplimentare privind comportarea anumitor categorii de piese sau epruvete din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D, atunci când asemenea piese sunt supuse anumitor categorii de solicitări.

Modelarea cu elemente finite este un proces complex care presupune o serie de etape și programe specializate de calculator.

Folosind pachetul de programe de calculator ANSYS, a fost posibilă evidențierea modului de deformare a unei piese de tip inel, atunci când o asemenea piesă este solicitată la tracțiune. Un rezultat al unei asemenea

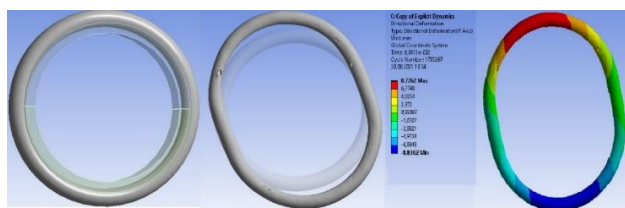


Fig. 3.6. Utilizarea analizei cu elemente finite în cazul unei epruvete de tip inel din material plastic fabricată prin tipărire 3D și care este solicitată la tracțiune

modelări poate fi observat în fig. 3.6, în care se observă modul de deformare a piesei atunci când piesa respectivă este supusă unor eforturi de întindere în lungul unei direcții care trece prin axa de simetrie a piesei ce prezenta inițial o formă circulară.

Rezultatul la solicitarea mecanică ce vizează deformarea piesei pe axa Y este de max. 8,77 mm, până în momentul ruperii. Se poate observa și diferența din forma circulară inițială a piesei și forma ovalizată a acesteia după supunerea la solicitarea la tracțiune.

S-au realizat simulări în programul specializat ANSYS corespunzătoare unor încercări la tracțiune și la compresiune. De asemenea, s-a analizat transferul termic printr-o piesă din material plastic și, totodată, capacitatea unei piese tipărite 3D din material plastic de a izola fonic.

Concluzii la capitolul al 3-lea:

1. În cadrul capitolului al 3-lea s-au prezentat metode de analiză teoretică privind cercetările ce se pot realiza conform cu tema tezei de doctorat. Există o multitudine de variante de cercetare teoretică, iar în cazul de față au fost abordate câteva, cu reprezentări grafice specifice în vederea pregătirii cercetărilor experimentale.

2. Prin analiza sistemică s-au identificat categoriile de factori de influență asupra procesului de tipărire 3D și asupra proprietăților de exploatare. Analiza sistemică prezintă factorii direcți ce intervin în cazul tipăririi, adică factori ce țin de echipamentul de tipărire, de specificațiile tehnice ale piesei și de procesul de tipărire, de la configurarea pe calculator, la tipărirea efectivă. Totodată, analiza sistemică evidențiază și factorii perturbatori ce intervin și care nu pot fi controlați, cum ar fi factorii de mediu sau chiar de operatorul uman ce poate introduce erori în sistem, însă sunt necesare cunoașterea și considerarea unor factori perturbatori pentru a pregăti etapele procesului de tipărire 3D în mod corespunzător.

3. Prin diagrama Ishikawa s-a dorit evidențierea unui număr cât mai mare de factori de influență în procesul de tipărire și finalmente în proprietățile de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărirea 3D. Metoda numită și „metoda celor 6 M-uri”, identifică factori ce țin de metoda de tipărire 3D, de materiale plastice și proprietățile lor, de operatorul uman și cum intervenția lui în proces poate impacta negativ performanța procesului, de mediul de lucru și cum factorii de mediu pot influența calitatea piesei, deformările care apar sau deteriorarea materialului. Mai mult, prin modalitățile de măsurare sau prin echipamentul de tipărire, factorii de intrare pot cunoaște valori diferite și combinații de factori diferiți, încât rezultatele unor posibile solicitări mecanice să difere semnificativ.

4. Prin metoda diagramei de idei s-a dorit exemplificarea grafică a elementelor constitutive ale unui subansamblu sau ale unui criteriu de analiză a procesului de tipărire 3D, având avantajul că prin combinarea unor elemente de pe coloane diferite pot reieși combinații de factori diferiți, cu rezultate diferite, în vederea analizei proprietăților de exploatare. Pentru tipărirea 3D, diagrama de idei poate fi o metodă de inovare prin deschiderea orizontului spre noi condiții de lucru pentru un material plastic ales.

5. Analiza SWOT a prezentat aspecte administrative și de piață despre procesul de tipărire 3D, evidențiind avantajele cercetărilor din acest domeniu, prin inovare, prin aderarea la tendințele pieței și prin totalitatea avantajelor ce le propune.

6. Pe de altă parte, prin proiectarea axiomatică, a fost posibilă identificarea unor variante simple și optime a unor echipamente ce vor fi prezentate în detaliu în capitolul următor și utilizate apoi în cadrul cercetărilor experimentale.

7. Nu în ultimul rând, prin metoda analizei cu element finit aplicată în cazul mai multor cercetări, s-a evidențiat pe de o parte complexitatea metodei, posibilitățile de cercetare teoretice pe care le presupune, gradul de detaliu și parametrii oferiți ca rezultate în urma investigațiilor și totodată obținerea unor valori teoretice ale solicitărilor mecanice, care ar putea fi comparate ulterior cu rezultatele cercetărilor experimentale și observate abaterile. Abaterile cu valori mici pot evidenția avantajul unor investigații viitoare teoretice care oferă o imagine clară și intuitivă asupra a ceea ce se așteaptă și cu rezultat în cercetarea experimentală, fără a fabrica epruvete și a investi în echipament, materiale și investigații practice.

Capitolul 4

ECHIPAMENTE ȘI MATERIALE FOLOSITE ÎN CADRUL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA UNOR PARAMETRI AI PROCESULUI DE TIPĂRIRE 3D ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI DE EXPLOATARE ALE PIESELOR DIN MATERIALE PLASTICE

Evidențierea influenței exercitate de către diferiți factori asupra anumitor proprietăți de exploatare a pieselor/ epruvetelor fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D fac necesară utilizarea unor echipamente și aparate pentru inițierea și desfășurarea unor cercetări experimentale orientate într-o asemenea direcție.

Asemenea echipamente și aparate vor include desigur cel puțin un echipament care să permită materializarea unui proces de tipărire 3D, fiind folosit, în acest scop, un echipament care se bazează pe avansarea treptată a unui filament din material încălzit până la atingerea unei anumite stări plastice și depunerea ulterioară a filamentului topit în straturi succesive, până la obținerea, în final, a unei piese sau uneori chiar a unui ansamblu ce poate încorpora mai multe piese. La selectarea unui asemenea echipament, au fost luate în considerare criterii de accesibilitate în folosirea lui, dar și posibilitățile de modificare a valorilor unor factori de intrare în procesul de tipărire 3D.

În afara echipamentului utilizabil pentru materializarea procesului de tipărire 3D, sunt necesare aparate și dispozitive care să permită evaluarea unor proprietăți fizico-mecanice, și nu numai, ale materialelor din componența pieselor sau epruvetelor tipărite 3D. Unele dintre aceste aparate există în dotarea laboratoarelor din structura Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din Facultatea de Construcții de Mașini și Management Industrial a Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași; alte asemenea aparate au fost achiziționate, după cum, în unele situații, a fost necesară conceperea și realizarea propriu-zisă a unor dispozitive care să faciliteze efectuarea unor încercări experimentale destinate să evidențieze măsura în care unii factori de intrare în procesul de tipărire 3D sunt în măsură să afecteze proprietățile fizico-mecanice și cele de exploatare ale

materialelor aflate în componența pieselor tipărite 3D. Plecând de la ipoteza că unele dintre aceste dispozitive prezintă anumite aspecte de originalitate în raport cu cele existente în laboratoare sau descrise în literatura de specialitate accesibilă, au fost elaborate și înaintate către autoritățile competente documentații corespunzătoare unor propuneri de invenții.

Tabel 4.1. Echipamente și dispozitive utilizate în cadrul cercetărilor experimentale

Nr. ordine	Denumire echipament
1	Imprimanta de tip Ultimaker 2+
2	Echipament pentru studiul rezistenței la abraziune a unor epruvete din materiale plastice realizate prin tipărire 3D
3	Echipament pentru testarea capacității de izolare fonică a unor panouri din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D
4	Echipament pentru cercetarea comportării la tracțiune a epruvetelor de tip inel din materiale plastice obținute prin tipărire 3D
5	Mașina universală pentru încercări mecanice de tip WDW 50 utilizată pentru încercările aplicate pieselor din materiale plastice tipărite 3D
6	Durimetru pentru măsurarea durtății materialelor plastice utilizate la piesele tipărite 3D
7	Camera cu termoviziune HTI HT-18 utilizată pentru observarea transferului termic în piesele obținute prin tipărire 3D, fabricate din materiale plastice
8	Sonometru tip SLM-270 HY1361 profesional utilizat pentru captarea undelor sonore în cazul unor piese tipărite 3D din materiale plastice
9	Rugozimetrul Surtronic 25 utilizat pentru măsurarea rugozității
10	Mini boxă portabilă Andowl Bass Model M10 utilizată pentru generarea sunetelor în vederea analizei capacității de izolare fonică a pieselor din materiale plastice folosite la tipărirea 3D
11	Echipament utilizat pentru studiul transferului termic în cazul pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D
12	Balanța analitică RADWAG utilizată pentru măsurarea masei pieselor din materiale plastice tipărite 3D

În vederea realizării unor cercetări experimentale nu sunt necesare doar echipamente care să permită realizarea unor încercări și consemnarea unor deformații, căci acest lucru nu ar fi posibil fără prezența unor epruvete, realizate în acest caz din materiale plastice și asupra cărora se fac respectivele încercări. Materia primă folosită, precum și geometriile epruvetelor sunt factori esențiali în obținerea unor rezultate optime și, totodată, care să releve influența unor factori ai procesului asupra proprietăților de exploatare ale materialelor plastice.

Proprietățile introduse în cadrul tabelului 4.2 au fost adăugate în ideea ilustrării comparative a capacității acestor materiale plastice și a evidențierii posibilităților de utilizare în diferite aplicații ulterioare (Simplify3D, 2024).

Tabel 4.2. Proprietăți de bază ale materialelor folosite în cadrul încercărilor experimentale

Proprietăți	Material					PP
	PLA	HIPS	PETG	ABS	PC	
Densitate, ρ , kg/m ³	1250	1040	1230	1040	1200	900
Rezistența la tracțiune, R_m , MPa	32.9	42	31.9	40	72	32
Temperatură folosită la tipărire, °C	180–220	220–240	220–260	220–250	260–310	220–250
Coeficient al expansiunii termice, $\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$	68	80	60	90	69	150
Flexibilitate						x
Rezistența la impact		x		x	x	
Rezistența la raze UV					x	
Rezistența la oboseală			x		x	x
Preț / kg, \$	10-40	24-32	20-60	10-40	40-75	60-120

Concluzii la capitolul al 4-lea:

1. Analiza echipamentelor și a materialelor plastice avute în vedere ajută în atingerea obiectivelor cercetărilor experimentale, fiind condițiile de bază pentru începerea acestora.
2. Trecerea în revistă a echipamentelor a evidențiat multitudinea acestora, ceea ce va sublinia și diversitatea cercetărilor experimentale propuse în cadrul acestei teze de doctorat, dar, în același timp, va permite analiza incipientă a necesarului pentru cercetare și achiziționarea unor echipamente în cazul în care acestea lipsesc, sau formularea unor idei care, în final, să se materializeze în echipamente specifice.
3. Analiza echipamentelor mai prezintă avantajul înțelegerii principiilor de utilizare, precum și a complexității fiecăruia în parte.
4. Enumerarea materialelor plastice folosite în cadrul investigațiilor experimentale oferă o imagine asupra proprietăților de exploatare care pot fi îmbunătățite prin variația factorilor de intrare în procesul de tipărire 3D, plecând de la proprietățile fizice și mecanico-chimice ale materialelor plastice din care acestea sunt create.
5. Totodată, materialele plastice analizate sunt în concordanță cu tendințele pieței și cu interesele de analiză ale altor cercetători, iar obiectul este inovarea și utilizarea acestora, considerând parametri care le-ar putea permite optimizarea proprietăților de exploatare și oferirea de noi aplicații practice tehnice pieselor ulterior obținute.

Capitolul 5

Contribuții experimentale privind influența unor parametri ai procesului de tipărire 3D asupra unor proprietăți de exploatare ale pieselor din materiale plastice

Deși modelarea matriceală, în general, poate fi abordată în mod independent, ea fiind una dintre metodele capabile să faciliteze caracterizarea unui proces, a unui fenomen etc., folosirea unei asemenea soluții de modelare a condus la luarea ei în considerare în contextul utilizării metodei Taguchi.

În cadrul încercărilor experimentale efectuate în contextul cercetărilor doctorale, metoda Taguchi a fost utilizată cu precădere doar pentru partea de planificare a testelor experimentale, pentru a se obține o micșorare a numărului și a duratelor acestor teste.

Este ușor de constatat că aplicarea metodei celor mai mici pătrate implică efectuarea unui număr mare de încercări experimentale și alocarea unui timp mare pentru materializarea calculelor necesare a fi realizate după efectuarea respectivelor încercări.

Pentru a reduce volumul de testare a testelor experimentale, o soluție posibilă este aceea a folosirii unei modalități de planificare a încercărilor. În acest sens, se recurge la acceptarea anumitor valori sau niveluri ale factorilor de intrare (ale variabilelor independente) atunci când sunt efectuate încercările experimentale, urmărindu-se obiectivul de obținere a unui model matematic suficient de precis, dar cu un număr mai mic de încercări experimentale și cu un volum mai mic al calculelor ce trebuie efectuate.

Aplicarea metodei de planificare a încercărilor experimentale în cazul cercetării preciziei dimensionale la tipărirea 3D a unor piese din materiale plastice

Pentru a investiga influența exercitată asupra preciziei dimensionale de către unii dintre factorii de intrare în procesul de tipărire 3D, a fost conceput și materializat un program de cercetare experimentală prin care s-a urmărit evidențierea influenței exercitate de către câțiva asemenea factori asupra variației înălțimii și diametrului unor epruvete sub formă de bușe.

În calitate de criteriu de evaluare al adecvantei modelelor matematice considerate la rezultatele experimentale, a fost folosit criteriul lui Gauss. Folosind un program de calculator specializat, au fost determinate următoarele modele matematice empirice pentru înălțimea piesei H și respectiv pentru diametrul D :

$$H = 24,287h^{0,00214}v^{0,0033}c^{-0,000874}\theta^{0,00474}, \quad (5.1)$$

$$D = 20,107h^{-0,00405}v^{0,00527}c^{0,00124}\theta^{0,00293}, \quad (5.2)$$

în care h corespunde grosimii peretelui, v este viteza de tipărire, c definește condițiile de răcire, iar θ este temperatura setată pentru masa imprimantei.

Cea mai mare influență o exercită viteza de tipărire v și temperatura plăcii θ , întrucât în ambele modele matematice empirice exponenții atașați acestor factori de intrare au cele mai mari valori absolute. Creșterea vitezei de tipărire v determină o creștere a înălțimii piesei H și o scădere a diametrului piesei D , în timp ce creșterea temperaturii plăcii θ conduce, ca urmare, la o creștere atât a înălțimii piesei H , cât și a diametrului D .

Cercetarea influenței condițiilor de tipărire 3D asupra rezistenței la compresiune a unor epruvete cave de formă sferică

Evaluând o parte din caracteristicile și factorii de intrare ai procesului de fabricație, a fost luată decizia de a utiliza un experiment factorial ortogonal Taguchi de tip L9, cu 4 variabile independente având valori pe 3 niveluri. Dintre toate posibilele combinații ale celor valorilor celor patru factori de intrare, experimentul factorial ortogonal Taguchi de tip L9 ia în considerare doar 9 combinații, ale căror rezultate sunt capabile să evidențieze suficient de precis efectul exercitat de către factorii de intrare asupra comportamentului elastic al pieselor sferice cave, sub acțiunea unor eforturilor de comprimare axială.

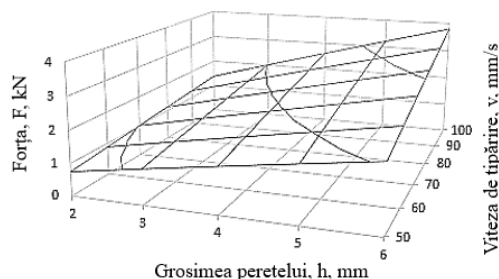


Fig. 5.1. Efectul grosimii peretelui și al vitezei de tipărire asupra mărimii forței maxime de comprimare care asigură încă o deformare elastică a materialului piese sferice cave ($c = 50\%$, $\theta = 60^\circ\text{C}$)

După cum era de așteptat, creșterea grosimii peretelui determină o creștere a elasticității pieselor sferice cave, întrucât exponentul atașat variabilei independente h are o valoare pozitivă.

Valoarea foarte scăzută a exponentului atașat factorului ce caracterizează condițiile de răcire (-0,0543) a arătat că, practic, acest factor de intrare în proces nu exercită o influență semnificativă asupra deformației elastice a piesei sferice cave pentru condițiile experimentale luate în considerare.

Analiza rezistenței la abraziune a unor materiale plastice utilizate la epruvetele fabricate prin tipărire 3D

Prin combinarea adecvată a valorilor parametrilor, în condițiile corespunzătoare ale unui experiment Taguchi, a fost definită matricea corespunzătoare dezvoltării unei cercetări experimentale care să evidențieze influența diferiților factori asupra rezistenței la abraziune a unor epruvete din două categorii de materiale plastice, tabelul 5.1 conținând toate aceste date. Condițiile de realizare a încercărilor experimentale și rezultatele obținute pentru fiecare dintre încercări sunt cele precizate în tabelul 5.2.

Tabel 5.1 Condiții de realizare a încercărilor experimentale destinate să permită evidențierea influenței exercitate de către unii factori asupra rezistenței la abraziune a unor pieselor realizate din materiale plastice prin tipărire 3D

Presiune, p , Pa: $p_1 = 79617$ Pa, $p_2 = 119426$ Pa					Viteza de tipărire , v_p , mm/s: $v_{p1} = 25$ mm/s, $v_{p2} = 35$ mm/s			
Viteza medie a deplasării relative dintre discul abraziv și epruveta din material plastic, v_t , m/min: $v_{t1} = 93$ m/min, $v_{t2} = 186$ m/min					Orientarea direcției de tipărire, α° : vertical/90°, orizontal/0°			
Granulația hârtiei abrazive: $g_1 = 180$, $g_2 = 320$					Material plastic, p_m : PET cu fibra de C 15%, PET. Durata testului, t , min: 25 s, 45 s.			
Grosimea stratului de tipărire : $h_1 = 0,1$ mm, $h_2 = 0,2$ mm								
Nr. exp.	Distribuirea parametrilor de intrare pentru fiecare variabilă independentă							
	Presiunea, p , Pa	Viteza medie de deplasare, v_t , m/min	Granulația hârtiei abrazive, g	Grosimea stratului tipărit h , mm	Viteza de tipărire, v_p , mm/s	Direcția de tipărire, α , °	Materialul plastic	Durata testului, t , min
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	79617	93	180	0,1	25	90	PET CF	25
2	79617	93	180	0,2	35	0	PET	25
3	79617	186	320	0,1	25	0	PET	25
4	79617	186	320	0,2	35	90	PET CF	25
5	119426	93	320	0,1	35	90	PET	45
6	119426	93	320	0,2	25	0	PET CF	25

7	119426	186	180	0,1	35	0	PET CF	25
8	119426	186	180	0,2	25	90	PET	20

Tabel 5.2. Valorile rezultate în urma încercărilor la abrazare a pieselor tipărite 3D

Nr.	Masa inițială, $m_{initial}$, g	Masa finală, m_{final} , g	Pierdere masă, Δm , g	Viteza de abrazare evaluată prin pierderea de masă, g/s	Lungimea inițială, $L_{initial}$, mm	Lungimea finală, L_{final} , mm	Diferență de lungime, Δl , mm	Viteza de abrazare a lungimii, v_e , mm/s
1	0,60288	0,57546	0,02742	0,00109	37,09	35,57	1,52	0,0608
2	0,71037	0,61835	0,09202	0,00368	52,51	43,27	9,24	0,3696
3	0,68033	0,55872	0,12161	0,00486	50,64	40,36	10,28	0,4112
4	0,77581	0,72619	0,04962	0,00110	51,43	45,33	6,1	0,244
5	0,77672	0,71657	0,06015	0,00240	51,69	45,37	6,32	0,140444
6	0,67028	0,65123	0,01905	0,00076	51,72	47,57	4,15	0,166
7	0,70952	0,59414	0,11538	0,00461	51,23	41,64	9,59	0,3836
8	0,70727	0,53934	0,16793	0,00839	51,51	37,22	14,29	0,7145

Modelele matematice de tip funcții putere determinate prin prelucrarea matematică a rezultatelor experimentale confirmă în mare parte ipotezele formulate inițial. Se constată astfel că o creștere a presiunii p , a vitezei medii v_t de deplasare relativă dintre epruvetă și discul abraziv conduc la o intensificare a procesului de abrazare, întrucât valorile exponenților atașați acestor factori în modelele matematice empirice sunt pozitive și relativ mari.

Încercarea la tracțiune a unor epruvete de tip inel din materiale plastice, fabricate prin tipărire 3D

Analiza modelului matematic empiric determinat și a reprezentării grafice elaborate prin luarea în considerare a respectivului model matematic, arată că cea mai mare influență asupra rezistenței la tracțiune R_m a epruvetei de tip inel este exercitată de către diametrul D , corespunzător formei generale circulare a inelului, acesta fiind urmat, din punctul de vedere al influenței exercitate, de către diametrul d al secțiunii transversale prin corpul inelului. În modelul matematic empiric, valorile absolute ale exponenților atașați celor doi factori de intrare sunt relativ mari în raport cu valorile absolute ale exponenților ce corespund celorlalți doi factor de intrare luați în considerare (conținutul procentual de umplere a epruvetei i și respectiv grosimea t a stratului tipărit).

Capacitatea pieselor tipărite 3D din materiale plastice de a permite transferul de energie termică

Testele experimentale au fost efectuate pe epruvete din acid polilactic. A fost luată în considerare posibilitatea utilizării unui experiment factorial complet de tip L8, cu trei variabile independente la două niveluri de variație. În calitate de factori de intrare, s-a folosit o mărime care oferă informații despre conținutul procentual i de umplere cu material a epruvetei (cu două niveluri, unul de 20% și unul de 50%), durata t de la inițierea procesului de încălzire a epruvetei (cu valori de 1-4 minute) și distanța l până la zona de intrare a probei de testat în piesa suport din aliaj de aluminiu.

Prelucrarea rezultatelor experimentale a fost realizată de asemenea prin folosirea programului de calculator specializat (Crețu, 1992).

În aceste condiții, a fost posibilă stabilirea următorului model empiric matematic de variație a temperaturii θ de-a lungul barei, în funcție de un parametru al procesului de tipărire 3D (conținutul procentual i de umplere a epruvetei), distanța l de la capătul încălzit al epruvetei și intervalul de timp t la care se efectuează măsurarea temperaturii θ :

$$\theta = 55,203 i^{-0,0258} t^{0,202} l^{-0,774} \quad (5.3)$$

Examinarea acestui model matematic empiric conduce la concluzia că cea mai puternică influență asupra temperaturii θ o exercită distanța l până la suprafața piesei suport din aliaj de aluminiu, urmată de timpul t și de conținutul procentual i de umplere a epruvetei, deoarece valorile absolute ale exponenților atașați factorilor de intrare în procesul investigat sunt în această ordine descrescătoare.

Examinarea valorilor exponenților menționați mai permite să se constate că o mărire a factorilor de intrare în proces corespunzătoare creșterii conținutului procentual i de umplere a epruvetei și respectiv a distanței l conduc la o scădere a temperaturii θ (scădere însă mult diminuată în cazul conținutului procentual i de umplere a epruvetei), în timp ce mărirea duratei de încălzire are drept rezultat o mărire a temperaturii θ .

Tabel 5.3. Rezultate centralizate ale unor măsurători de intensitate a sunetelor, cu evidențierea diferenței ce apare în prezența și în absența panoului din material plastic cu rol de izolare fonică (panourile au o suprafață de 100x100 mm² și o grosime 6 mm, iar materialul folosit este PLA)

Nr. exp.	Volum, V, %	Frecvența, f, Hz	Intensitatea sunetelor, I, dB		Diferența ΔI, dB
			Fără panoul fabricat prin tipărire 3D	În prezența panoului fabricat prin tipărire 3D	
1	10	5000	42,9	38,76	4,14
2	10	10000	34	32,66	1,34
3	10	15000	33,7	32,5	1,2
4	10	20000	33,1	32,66	0,44
5	20	5000	62,2	56,95	5,25
6	20	10000	62,7	47,8	14,9
7	20	15000	47,85	37,15	10,7
8	20	20000	41,4	37,2	4,2
9	30	5000	77,05	71,2	5,85
10	30	10000	78,95	62	16,95
11	30	15000	61,4	37,2	24,2
12	30	20000	48,1	37,15	10,95
13	40	5000	87,5	82,1	5,4
14	40	10000	88,2	72,8	15,4
15	40	15000	72,9	37,4	35,5
16	40	20000	57,2	37,2	20
17	50	5000	95,3	90	5,3
18	50	10000	95,9	81,1	14,8
19	50	15000	81,25	38,1	43,15
20	50	20000	63,7	37,3	26,4
21	60	5000	101,7	96,4	5,3
22	60	10000	102,75	87,6	15,15
23	60	15000	87,7	44,4	43,3
24	60	20000	74,05	37,53	36,52
25	70	5000	106,8	101,7	5,1
26	70	10000	107,95	93,35	14,6
27	70	15000	93,1	98,2	-5,1
28	70	20000	79,5	38,3	41,2
29	80	5000	110,75	105,75	5
30	80	10000	111,9	97,38	14,52
31	80	15000	96,7	49,5	47,2
32	80	20000	83,8	40,2	43,6
33	90	5000	113,5	108,68	4,82
34	90	10000	115,1	102,1	13
35	90	15000	103	52,38	50,62
36	90	20000	87,5	44,23	43,27
37	100	5000	113,55	108,8	4,75
38	100	10000	115,85	11,04	13,05
39	100	15000	106,5	54,4	52,1
40	100	20000	91,25	48,1	43,15

Influența diferiților factori asupra durității materialului plastic din piese fabricate prin tipărire 3D

Funcția identificată de programul specializat de calculator ca fiind cea mai adecvată pentru rezultatele experimentale luate în considerare a fost o funcție hiperbolică, de forma următoare:

$$HD = 83,023 + \frac{20,174}{m} - \frac{1,673}{h} - \frac{1750,681}{s} - \frac{3,784 \cdot 10^{-7}}{c} + \frac{214,215}{i} - \frac{0,286}{l}, \quad (5.4)$$

în această situație, criteriul lui Gauss având valoarea de $S_G = 7,363323$.

Ca și în alte cazuri abordate în prezenta teză și practice din aceleași motive, a fost identificată și o funcție de tip putere, dată fiind capacitatea acesteia de a permite formularea operativă a unor constatări principiale prin examinarea valorilor exponenților atașați fiecăreia dintre variabilele independente.

În acest fel, a devenit posibilă scrierea următorului model matematic empiric de tip funcție putere:

$$HD = 19,04 \cdot m^{-0,19} \cdot h^{0,0184} \cdot s^{0,558} \cdot c^{-0,000383} \cdot i^{0,24} \cdot l^{-0,0559}, \quad (5.5)$$

caz în care criteriul Gauss are valoarea de $S_G = 3937,65$.

Se poate constata că în cazul ultimului model matematic empiric, criteriul lui Gauss are o valoare mai mare decât cel din cazul funcției hiperbolice, confirmând faptul că respectiva funcție este mai adecvată pentru caracterizarea influenței exercitate de către factorii de intrare luați în considerare asupra durității, în calitatea acestora de parametru de ieșire din procesul de investigare.

Examinarea modelului matematic empiric de tip funcție putere permite să se constate că viteza de tipărire și gradul de umplere exercită cea mai puternică influență asupra valorii durității, pentru ambii factori observându-se faptul că le-au fost afectate valori mai mari ale exponenților, în raport cu valorile exponenților celorlalți factori incluși în modelul matematic. În ceea ce privește influența vitezei de tipărire, se constată că la o viteză mai mare de tipărire se înregistrează valori mai mari ale durității materialului, după cum o mărire a conținutului procentual de umplere cu material a epruvetei are drept rezultat de asemenea o mărire a durității.

Influența diferiților factori asupra rugozității suprafețelor pieselor fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D

La nivelul suprafeței exterioare a unei piese, profilul generat prin depunerea succesivă a unor straturi de material plastic topit, ar putea, într-o secțiune perpendiculară pe direcția de depunere, să formeze o înălțuire de arce de elipsă (fig. 5.4).

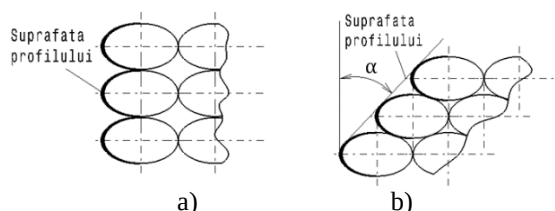


Fig. 5.4. Generarea profilului suprafeței unei piese obținute prin procedeul de modelare prin depunere de material topit: a – în cazul unui perete vertical; b – în cazul unui perete caracterizat printr-un unghi de înclinare α față de direcția verticală

Pentru realizarea epruvetelor a fost folosit un echipament de tipărire 3D de tip Ultimaker 2+ (fabricat de compania Ultimaker – Olanda). În calitate de factori de intrare corespunzători procesului de tipărire 3D, în afara valorii unghiului α de înclinare a suprafeței, au fost luate în considerare condițiile de răcire (variabila c , în %). Valorile altor factori de intrare în procesul de tipărire 3D au fost menținute constante (viteza de tipărire $v = 50$ mm/s, înălțimea stratului $h = 0,1$ mm, conținutul procentual de umplere $i = 25$ %, etc.). Valorile unor parametri de rugozitate a suprafețelor corespunzători celor 6 zone dispuse la periferia epruvetei sub forma unui sfert de disc au fost măsurate cu ajutorul unui rugozimetru tip Surtronic S25 (Taylor Hobson, Marea Britanie).

Modelele matematice empirice determinate cu ajutorul programului specializat de calculator și respectiv valorile criteriului lui Gauss (folosite pentru evaluarea gradului de adecvanță a fiecăruia dintre modelele matematice empirice determinate) au fost înscrise în tabelul 5.4.

Tabel 5.4. Modele matematice empirice și valoarea criteriului lui Gauss S_G pentru fiecare model.

Grup	Ecuatie	S_G	Nr. ecuație
1	$R_p = 1073,19 \cdot c^{-0,289} \cdot \alpha^{-0,688}$	28,50822	(5.6)
1	$R_z = 1241 \cdot c^{-0,304} \cdot \alpha^{-0,501}$	111,9492	(5.7)
1	$R_t = 1026,33 \cdot c^{-0,225} \cdot \alpha^{-0,55}$	126,7168	(5.8)
2	$R_a = 936,327 \cdot c^{-0,448} \cdot \alpha^{-0,672}$	6,918129	(5.9)
2	$R_q = 863,345 \cdot c^{-0,412} \cdot \alpha^{-0,645}$	8,687672	(5.10)
2	$R_c = 2965,006 \cdot c^{-0,432} \cdot \alpha^{-0,662}$	77,73966	(5.11)

În toate cazurile, influența cea mai puternică este exercitată de către valoarea unghiului α , deoarece valorile exponenților atașați factorului α sunt mai mari decât cele ale exponenților atașați factorului c .

Influența diferiților factori asupra rezistenței la compresiune a unor epruvete din material plastic compozit fabricate prin tipărire 3D

În cadrul acestui subcapitol, s-a intenționat să se prezinte rezultatele unor cercetări experimentale prin care a fost abordată problema studierii comportării la compresiune a unor epruvete sub formă de corpuri sferice (bile) fabricate din materiale plastice compozite de tip ceramică-plastic prin tipărire 3D.

S-a apreciat că, prin utilizarea analizei gravimetrice, se pot obține încă informații suplimentare cu privire la comportarea materialelor compozite de tip ceramică-plastic incluse în epruvete de formă sferică și fabricate prin tipărire 3D. Ulterior, s-au determinat modele matematice empirice capabile să evidențieze influența unor

factori legați de procesul de tipărire 3D asupra rezistenței la compresiune a materialelor încorporate în epruvetele de formă sferică.

În condițiile menționate, factorii de intrare au fost viteza de tipărire ($v_{min} = 30$ mm/s, $v_{max} = 50$ mm/s), grosimea stratului tipărit ($t_{min} = 0,15$ mm, $t_{max} = 0,2$ mm), conținutul procentual de umplere ($i_{min} = 50$ %, $i_{max} = 100$ %), temperatura plăcii corespunzătoare mesei imprimantei ($\theta_{p_{min}} = 50$ °C, $\theta_{p_{max}} = 60$ °C), temperatura de extrudare ($\theta_{e_{min}} = 215$ °C, $\theta_{e_{max}} = 230$ °C), prezența (c_1) sau absența răcirii (c_2) și valoarea unghiul raster ($\alpha_{min} = 45^\circ$, $\alpha_{max} = 90^\circ$).

Au fost identificate următoarele modele matematice empirice de tip funcție putere:

- Pentru materialul polimeric compozit cu elemente ceramice de tip argilă:

$$F = 0,0985 v^{0,0212} i^{0,105} t^{0,632} \theta_p^{-0,0401} \theta_e^{0,255} c^{-0,001063} r^{-0,00970} \quad (5.12)$$

- Pentru materialul polimeric compozit cu elemente ceramice de tip teracotă:

$$F = 0,0639 v^{0,198} i^{-0,350} t^{0,587} \theta_p^{0,526} \theta_e^{-0,248} c^{-0,0094} \theta_r^{-0,100} \quad (5.13)$$

- Pentru materialul polimeric compozit cu elemente ceramice de tip beton:

$$F = 3403,831 v^{-0,272} i^{-0,491} t^{0,812} \theta_p^{-0,773} \theta_e^{-1,098} c^{-0,260} r^{-0,204} \quad (5.14)$$

- Pentru materialul polimeric compozit cu elemente ceramice de tip granit:

$$F = 17,461 v^{-0,0728} i^{0,0907} t^{0,764} \theta_p^{-0,112} \theta_e^{-0,704} c^{0,0254} r^{0,0332} \quad (5.15)$$

S-a constatat astfel că cea mai puternică influență asupra forței F , la care este inițiat procesul de fisurare a epruvetei de forma unui corp sferic, este exercitată de către gradul de umplere i . Pe măsură ce gradul de umplere i crește, în toate cazurile se produce o mărire a valorii forței F , dat fiind faptul că are loc o creștere a rezistenței la acțiunea forței F , datorită unei umpleri mai complete a corpului sferic material (prezența unei cantități mai mari de material plastic compozit cu elemente ceramice în corpul sferic).

Cu excepția materialului plastic compozit cu elemente ceramice de tip argilă, creșterea temperaturii de extrudare θ_e a avut drept rezultat o reducere a mărimii forței F , cea mai semnificativă reducere având loc în cazul materialului plastic compozit cu elemente ceramice de tip ciment.

O explicație a acestei micșorări a influenței temperaturii de extrudare ar putea fi legată de o deformare mai puțin favorabilă rezistenței mecanice a șnurului depus pentru a constitui fiecare strat în cazul procesului de tipărire 3D, atunci când temperatura θ_e a crescut, pentru trei dintre materialele plastice compozite cu elemente ceramice din care au fost realizate corpurile sferice.

Analiza aspectului diagramelor de variație forță-deformație evidențiază faptul că, dacă în cazul celor mai multe dintre materiale din care au fost realizate epruvetele sub formă de corpuri sferice această variație are forma aproximativă a unei linii drepte, în cazul materialului plastic cu elemente ceramice tip ciment, se constată o variație sub forma unei înlănțuiri a mai multor segmente de linii curbe.

Acest lucru ar putea însemna că apar defecțiuni locale succesive multiple în materialul corpului sferic de tip ciment, atunci când epruveta a fost solicitată la comprimare. Asemenea defecțiuni sunt de așteptat să apară la contactul granulelor din material ceramic cu materialul plastic în care au fost înglobate granulele.

Concluzii la capitolul al 5-lea:

1. Cercetările experimentale s-au realizat prin metoda planificării experimentale, în vederea alegerii celor mai potriviți factori de intrare în procesului de tipărire 3D și care ar putea avea influența cea mai mare asupra rezultatelor unor încercări mecanice.
2. În vederea optimizării numărului de încercări experimentale, s-au aplicat variante ce țin de metoda Taguchi, ce are marele avantaj de combinare a factorilor aleși, într-un număr minim de încercări.
3. Fiecare cercetare experimentală a indicat impactul fiecărui factor ales ce ține de procesul de tipărire 3D asupra proprietății investigate. Acest lucru a fost facilitat de obținerea unor modele matematice, bazate pe metoda celor mai mici pătrate.
4. Pentru o evidențiere mai clară a modului de evoluție a unor proprietăți sau parametri, în funcție de factorii de intrare, s-au realizat reprezentări grafice.

Capitolul 6

Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare

Concluzii proprii

Prezenta teză de doctorat a avut în vedere analiza procedurii de fabricație prin tipărire 3D, în special a procedurii de modelare prin depunere de material topit, procedeu utilizat la fabricarea pieselor din materiale plastice. S-a acordat atenție și proprietăților de exploatare ale unor asemenea piese și posibilităților de influențare

a proprietăților de exploatare prin intermediul unora dintre parametrii specifici procesului de tipărire 3D. Acest lucru înseamnă că au fost abordate și aspecte în legătură cu care au fost formulate unele ipoteze teoretice privind posibila influență a unora dintre factorii de intrare în procesul de tipărire 3D asupra anumitor caracteristici de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D.

Obiectivul principal a fost deci cel de analizare a influenței pe care unii factori de intrare ai procesului de tipărire sunt în măsură să exercite influență asupra unor proprietăți fizico-mecanice ale materialelor încorporate în piesele fabricate prin tipărire 3D. Totodată, au fost luați în considerare și parametrii de ieșire ai unui asemenea proces, dintre care cei mai importanți au fost, desigur, cei care definesc calitatea piesei tipărite, întrucât un asemenea aspect este definitoriu pentru domeniile de utilizare ale materialului, respectiv ale piesei în cauză. Prin urmare, toate cercetările, încercările de modelare teoretică și experimentală au avut în vedere în primul rând îmbunătățirea calității și a performanțelor procesului de tipărire 3D, inclusiv din punctul de vedere al unei optimizări a desfășurării procesului de tipărire, astfel încât piesele tipărite să dispună de o calitate ridicată.

Prin cercetările efectuate a fost posibilă formularea unor concluzii ce vor fi menționate succint în continuare.

În domeniul cercetării documentare:

1. Examinarea unora dintre lucrările publicate până în prezent și în care au fost abordate aspecte aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat a arătat că fabricația aditivă s-a conturat, în ultimele decenii, ca o modalitate inovativă eficientă de fabricare a unei game largi de piese, cu forme simple, dar și complicate și care a fost inițial promovată ca o posibilitate de fabricare rapidă a prototipurilor, denumire ce a fost de altfel utilizată înainte de fi pe deplin cunoscute largile posibilități de utilizare a acestei noi tehnologii de fabricație;

2. S-a constatat că există mai multe procedee de fabricare aditivă, unele cunoscând o aplicare mai largă, altele fiind în mai mică măsură, cel puțin deocamdată, cunoscute și folosite pentru fabricarea de piese;

3. S-a apreciat că există câteva principii comune celor mai multe procedee de fabricare aditivă, acestea evidențiind faptul că generarea unei piese are loc prin adăugarea succesivă de straturi ce vor permite constituirea treptată a noii piese;

4. Dintre procedeele mai larg răspândite de fabricare aditivă a pieselor, au fost analizate mai amănunțit procedeele de stereolitografiere, de modelare prin depunere de material topit, de sinterizare selectivă cu laser. Faptul că modelarea prin depunere de material topit necesită echipamente mai simple și în mod frecvent, relativ ieftine, precum și ieșirea de sub protecție a primelor brevete referitoare la echipamentele de tipărire prin această metodă, au determinat o utilizare mai largă a unor asemenea echipamente, apreciate în prezent ca fiind accesibile atât specialiștilor (în variante mai complexe și cu posibilități tehnologice mai largi), cât și unui public mai larg și care nu dispune de cunoștințe avansate în acest domeniu (proiectanții unor asemenea echipamente asigurându-se că echipamentele în cauză pot fi utilizate de către persoane care nu sunt instruite în mod special în legătură cu procedeul de fabricație aditivă în ceea ce privește modelarea prin depunere de material topit;

5. Întrucât fabricarea aditivă face necesară o secționare a piesei de obținut cu planuri de secționare corespunzătoare unei așa-numite „felieri” a viitoarei piese, apariția metodei și a procedeele de fabricație aditivă a fost strâns legată de dezvoltarea programelor de calculator care să permită, pe de o parte, asigurarea posibilităților de secționare a piesei, iar pe de altă parte, asigurarea unor modalități adecvate de generare a fiecărui strat de material al piesei, ca urmare a realizării unor mișcări strict coordonate între sursa ce asigură aducerea materialului în stare plastică înainte de a fi depus și duza echipamentului. Se apreciază că, în acest fel, dezvoltarea metodei de fabricație aditivă folosind modelarea prin depunere de material topit a fost condiționată de deplina stăpânire a programării numerice asistate de calculator a mașinilor-unelte, așa numitele coduri G fiind elaborate, de fapt, prin luarea în considerare a unui ansamblu de cunoștințe specifice ce țin de folosirea comenzilor numerice ale mașinilor-unelte;

6. S-a constatat că există o gamă largă de materiale din care pot fi fabricate piese prin tipărire 3D, materiale ce pot fi folosite inclusiv la aplicarea modelării prin depunere de material topit. Asemenea materiale pot fi atât materiale metalice, aceasta însemnând metale pure, cât și aliaje metalice, dar de o largă răspândire s-au bucurat materialele plastice, care dispuneau de proprietăți ce facilitează utilizarea lor pentru fabricarea de piese prin tipărire 3D;

7. S-a constatat că nu numai piese individuale pot fi realizate prin tipărire 3D, dar că, prin asigurarea unor condiții adecvate, este posibilă inclusiv tipărirea unor subansambluri sau ansambluri ce încorporează piese distincte și care, la sfârșitul fabricației, pot fi puse imediat în funcțiune;

8. Așa cum era de așteptat, cercetările din domeniul fabricației aditive au urmărit și măsura în care aspecte referitoare la condițiile de generare a piesei pot exercita influență asupra proprietăților fizico-mecanice ale materialelor înglobate în piesele tipărite 3D și respectiv asupra unor proprietăți de interes din punctul de vedere al cerințelor de exploatare ale respectivelor piese;

9. S-a constatat că, în calitate de proprietăți fizico-mecanice ale materialelor din care se realizează piese prin utilizarea unor procedee de fabricație aditivă, se iau în considerare în mod frecvent rezistența acestor materiale la solicitări de tracțiune – compresiune, duritatea, după cum unii cercetători și-au îndreptat atenția, și asupra rezistenței la abraziune ori unele proprietăți termice, așa cum este, de exemplu, capacitatea de transfer a căldurii,

iar în unele situații proprietățile materialelor din componența pieselor tipărite 3D de a contribui eficient la izolarea fonică;

10. Pentru cercetarea unor asemenea proprietăți ale materialelor în general, dar și al materialelor folosite pentru fabricarea de piese prin metode aditive, au fost propuse echipamente care să permită cercetarea respectivelor proprietăți și asemenea echipamente ar putea fi utilizate inclusiv pentru relevarea influenței pe care ar putea-o exercita parametrii regimului de tipărire 3D asupra valorilor unor mărimi ce caracterizează proprietățile fizico-mecanice ori cele de exploatare ale materialelor înglobate în piese fabricate prin procedee de tipărire 3D;

11. Unele dintre aceste echipamente (cele destinate investigării proprietăților fizico-mecanice și respectiv de exploatare al materialelor utilizate pentru fabricarea de piese prin procedee de tipărire 3D ar putea necesita diferite modificări, pentru a le face mai adecvate cerințelor de utilizare a lor pentru investigarea comportării respectivelor materiale la diferitele solicitări ce ar putea fi întâlnite în condiții de funcționare sau de exploatare a pieselor fabricate prin procedee de tipărire 3D;

12. S-a constatat că au fost publicate rezultate ale unor cercetări teoretice și experimentale orientate spre modelarea teoretică sau empirică a unor fenomene specifice metodelor de fabricare a pieselor prin tipărire 3D sau a influenței pe care diferiți factori o pot exercita asupra proprietăților fizico-mecanice și de exploatare ale materialelor utilizate în procesele de tipărire 3D;

13. S-a apreciat că există un interes deosebit al cercetătorilor în direcția dezvoltării de noi procedee de fabricare a pieselor prin tipărire 3D, în investigarea proprietăților de care dispun materialele înglobate în piesele fabricate prin tipărire 3D, în mai completa cunoaștere a influenței pe care condițiile de desfășurare a proceselor de tipărire 3D pot afecta proprietățile fizico-mecanice și de exploatare ale materialelor utilizate la fabricarea unor piese din asemenea materiale;

14. Cercetarea documentară a permis identificarea unor direcții în cazul cărora există mai puține informații științifice și tehnice referitoare la influența condițiilor de fabricație asupra proprietăților de exploatare ale pieselor fabricate prin procedee de tipărire 3D ori a unor direcții mai puțin abordate în acest sens prin cercetări teoretice și experimentale;

15. În condițiile menționate anterior au fost identificate posibilități de dezvoltare a unor cercetări teoretice și experimentale în direcția investigării măsurii în care unii parametri ce caracterizează condițiile de tipărire 3D pot afecta proprietățile de exploatare ale materialelor înglobate în piesele tipărite 3D, inclusiv prin folosirea unor metode teoretice și experimentale intens promovate în ultimele decenii. În raport cu asemenea constatări, au fost definite obiective ale cercetărilor ce urmau să fie dezvoltate în cadrul cercetării doctorale, la stabilirea acestor obiective ținându-se cont inclusiv de posibilitățile de concepere și fabricare ale unor echipamente adecvate de cercetare experimentală, de existența unor asemenea echipamente în dotarea unor laboratoare sau de posibilitățile de achiziționare ale unor echipamente din categoria menționată.

În domeniul **propunerii și materializării unor cercetări teoretice** în conexiune cu tema asumată a tezei de doctorat, s-a ajuns la următoarele concluzii:

16. S-a plecat de la premisa că o imagine mai completă privind conținutul procesului de investigare a influenței pe care diferiții factori ar putea-o exercita asupra proprietăților de exploatare ale materialelor încorporate în piesele fabricate prin tipărire 3D ar putea fi obținută prin folosirea *metodei analizei sistemice*, a cărei aplicare necesită, în esență, luarea în considerare a procesului investigat în calitate de sistem, pentru care poate fi evidențiată existența unor factori de intrare, a unor factori perturbatori și respectiv a unor parametri de ieșire. S-a efectuat, ca atare, o analiză sistemică a procesului de tipărire 3D, pentru a se obține clarificări privind factorii și grupele de factori de intrare și respectiv acele mărimi ce pot fi considerate parametri de ieșire ai procesului investigat;

17. O altă metodă teoretică utilizată pentru relevarea conexiunilor între factorii de intrare în procesul de tipărire 3D și rezultatele obținute ca urmare a folosirii acestui proces a fost metoda diagramei Ishikawa. S-a apreciat că, deși metoda a fost promovată inițial ca o metodă de stabilire a cauzelor care determină un anumit efect, există posibilitatea de utilizare a metodei diagramei Ishikawa pentru a obține o imagine mai amplă asupra factorilor și a grupelor de factori ce pot exercita influență asupra valorilor unor parametri de performanță ai procesului de tipărire 3D. S-a constatat că principalele grupe de factori sunt cele referitoare la conceperea modelului digital al viitoarei piese, materialele utilizate pentru realizarea fizică a pieselor, prin proprietățile de care dispun aceste materiale, modul de orientare a piesei de tipărit pe masa imprimantei, un număr de factori care țin de mediul înconjurător și de către operatorul care reglează echipamentul de tipărire, valorile parametrilor ce definesc regimul de tipărire 3D;

18. O metodă teoretică de analiză a soluțiilor existente și despre care se presupune că facilitează identificarea de noi soluții de rezolvare a unei probleme tehnice este metoda diagramei de idei. Această metodă a fost aplicată pentru evidențierea diferitelor variante ale componentelor unui sistem de tipărire 3D, ea contribuind la o mai clară definire a condițiilor de efectuare ulterioară a cercetărilor experimentale. Au fost luate în considerare, în calitate de subansambluri sau componente pentru care trebuie selectată o anumită variantă, forma sub care se prezintă materialul de tipărit, modul de acționare în vederea realizării diferitelor deplasări de către componentele mobile ale imprimantei, natura propriu-zisă a materialelor din care urmau să se realizeze epruvetele,

modul de încălzire a materialului, în vederea aducerii lui în starea plastică necesară pentru generarea unor straturi succesive ale piesei sau epruvetei de realizat, modul de răcire de la temperatura corespunzătoare stării de plasticitate a materialului, până la temperatura obișnuită a mediului înconjurător din spațiul în care urma să se desfășoare procesul de tipărire;

19. Pentru o mai bună clarificare a aspectelor favorabile și respectiv mai puțin convenabile ale procesului de tipărire 3D, s-a apelat la metoda SWOT. Aplicarea metodei a facilitat identificarea așa-numitelor puncte tari ale procesului de tipărire 3D, a punctelor slabe ale acestei metode de fabricație aditivă, a oportunităților ce ar putea facilita continuarea răspândirii ei și cu deosebire a diferitelor echipamente de tipărire 3D de către specialiști sau de către persoane cu mai puține cunoștințe sau abilități în acest domeniu și respectiv a amenințărilor, adică a riscurilor ca dezvoltarea în continuare a metodei de tipărire 3D să fie afectată și de către evenimente mai puțin favorabile. S-a apreciat că metoda SWOT a relevat existența unor reale posibilități de dezvoltare și utilizare intensă, cel puțin în perioada imediat următoare, a procedeeleor de tipărire 3D și cu deosebire a procedeului de modelare prin depunere de material topit;

20. O metodologie de proiectare frecvent agreată și luată în considerare de cei care urmăresc realizarea de noi produse sau tehnologii a fost așa-numita proiectare axiomatică, ce implică luarea în considerare a două axiome apreciate ca definitorii pentru metodologia menționată și anume a axiomei independenței cerințelor funcționale și respectiv a axiomei informațiilor. S-a plecat de la premisa că o mai bună cunoaștere a cerințelor funcționale și a unor soluții adecvate de a se răspunde la fiecare dintre cerințele funcționale de diferite ordine de detaliere poate favoriza o rezolvare sistematică a problemei de proiectare abordată și, în același timp, poate facilita identificarea unor soluții caracterizate prin anumite aspecte de originalitate. Din motive de natura celor menționate anterior, s-a recurs la dezvoltarea unor cercetări teoretice care să permită conceperea unor structuri utilizabile ulterior pentru cercetarea experimentală a unor proprietăți de exploatare a pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D, în forma particulară pe care o îmbracă procedeul de modelare prin depunere de material topit;

21. O primă utilizare a unora dintre principiile proiectării axiomatice a urmărit conceperea unei soluții de echipament care să permită cercetarea experimentală a capacității de izolare fonică a unor materiale plastice încorporate în piese fabricate prin tipărire 3D. A fost astfel elaborată treptat o soluție de echipament caracterizată prin existența mai multor compartimente, în care să fie amplasate o sursă de sunete, epruveta din material plastic și respectiv senzorul unui aparat pentru măsurarea intensității sunetelor. La cerința funcțională, ca senzorul de recepționare a sunetelor care trec prin epruveta sub forma unei plăci de mici dimensiuni să ia în considerare într-o măsură cât mai redusă posibilele sunete reflectate de pereții compartimentelor echipamentelor, s-a răspuns prin prevederea amplasării, pe pereții respectivi, a unor plăci din materiale cu o ridicată capacitate de absorbție a sunetelor;

22. Intenționându-se dezvoltarea ulterioară a unui echipament care să permită cercetarea experimentală a modului în care are loc transferul energiei termice prin epruvete realizate din materiale plastice prin tipărire 3D, au fost aplicate de asemenea principii din proiectarea axiomatică, prin formularea cerințelor funcționale specifice diferitelor componente ale unui astfel de echipament și identificarea modalităților de rezolvare a acestor cerințe. A fost identificată o soluție ce presupunea folosirea unei epruvete de formă cilindrică, încălzită la un capăt cu ajutorul unei rezistențe electrice și în cazul căreia transferul energiei termice putea fi urmărit cu ajutorul unei camere de luat vederi în infraroșu, al cărei program permitea inclusiv identificarea temperaturilor atinse în diferite zone ale epruvetei, la anumite intervale de timp de la începerea procesului de încălzire;

23. O a treia utilizare a unora dintre principiile proiectării axiomatice a fost cea prin care s-a urmărit identificarea unei soluții de echipament care să permită evaluarea mărimii forței de frecare între suprafețe ale unor epruvete fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D și suprafețe ale unor piese din material plastic sau din material metalic pe care să poată fi deplasate epruvetele fabricate prin tipărire 3D. S-a constatat că prin folosirea unora dintre principiile proiectării axiomatice a devenit posibilă identificarea unui dispozitiv care să poată fi adaptat pe un strung universal, în vederea exploatării largilor posibilități ale unei asemenea mașini-unelte de realizare a unor deplasări liniare cu viteze variabile între limite foarte largi, deplasări corespunzătoare mișcării de avans longitudinal realizate de către căruciorul strungului universal. Cerințele funcționale formulate au permis identificarea diferitelor subsisteme ale dispozitivului de măsurare a mărimii forței de frecare, adaptabil pe un strung universal;

24. Intenționându-se efectuarea unor cercetări experimentale care să evidențieze influența diferiților factori asupra preciziei dimensionale a pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D, au fost formulate unele ipoteze teoretice privind comportarea unor epruvete sub formă de bușe cilindrice netede și respectiv a unor epruvete sub formă de corpuri sferice pline, atunci când sunt supuse unor eforturi de compresiune.

25. Cunoscându-se posibilitățile de utilizare a metodei elementului finit pentru studiul teoretic al comportării unor corpuri de forme prestabilite sub acțiunea unor solicitări de natură mecanică, a fost luată în considerare folosirea acestei metode mai întâi în cazul unor piese de tip inel de lanț fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D. Reprezentanțele grafice obținute prin utilizarea metodei elementului finit au facilitat identificarea acelor zone ale pieselor având forma unui inel de lanț în care, datorită depășirii limitelor de rezistență ale

materialului piesei de tip inel, există o probabilitate ridicată de inițiere și propagare a unor fisuri care vor conduce, în final, la ruperea piesei de tip inel de lanț;

26. Aspecte interesante obținute de asemenea prin folosirea metodei elementului finit au fost cele referitoare la comportarea unor epruvete sub forma unor corpuri sferice cave, atunci când acestea sunt supuse unor solicitări la compresiune. Metoda menționată a permis evidențierea acelor zone în care, datorită valorilor mari ale tensiunilor generate de procesul de comprimare, există o probabilitate ridicată de amorsare a fisurilor care, prin propagare, vor determina deteriorarea masivă a epruvetei sub formă de corp sferic cav, cu o anumită grosime a peretelui și fabricat dintr-un material plastic definit prin anumite proprietăți de rezistență la solicitări mecanice;

27. Metoda analizei cu elemente finite a fost încă utilizată pentru obținerea unor informații referitoare la modul de transmitere a sunetelor prin panouri de mici dimensiuni fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D. În calitate de factor cu posibilă influență asupra propagării sunetelor printr-o placă de mici dimensiuni din material plastic a fost luată în considerare modalitatea de umplere a spațiului din interiorul epruvetei de tip placă, recurgându-se în acest sens la luarea în considerare a unei umpleri de tip grilă și respectiv de tip giroidal.

În domeniul *identificării și caracterizării unei baze materiale utilizabile*, în vederea efectuării părții experimentale a cercetării doctorale, se consideră că principalele concluzii sunt următoarele:

28. Ținând cont de ansamblul considerațiilor prezentate anterior, de posibilitățile de acces la anumite echipamente de tipărire 3D, s-a optat pentru folosirea unei imprimante care să folosească principiul modelării prin depunere de material topit, asemenea imprimante existând în laboratoarele Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din Facultatea de Construcții de Mașini și Management Industrial din cadrul Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași; date fiind caracteristicile de utilizare mai performante, s-a optat pentru folosirea unei imprimante de tip Ultimaker 2+, fabricate în Olanda;

29. Pentru studiul comportării la abrazare a unor epruvete de formă cilindrică, fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D, a fost conceput și realizat un dispozitiv ce permitea apăsarea epruvetelor pe suprafața orizontală a unor discuri pe care au fost amplasate hârtii abrazive cu diferite granulații, apăsarea fiind exercitată cu o forță de mărime cunoscută prin utilizarea unor greutateți amplasate pe un platan. În vederea micșorării forțelor de frecare, deplasarea verticală a tijei de susținere a platanului s-a efectuat prin intermediul unor bușe cu bile;

30. Aspecte diferite identificate anterior prin formularea cerințelor funcționale specifice au fost luate în considerare în cazul echipamentului destinat cercetării experimentale a capacității de izolare fonică a unor panouri de mici dimensiuni. A fost luată în considerare, la proiectarea acestui echipament, solicitarea de a permite variația mărimilor unor factori de intrare în procesul de investigare experimentală menționat anterior, în vederea determinării ulterioare a unor modele matematice empirice care să evidențieze influența respectivilor factori asupra absorbției energiei sonore de către panourile din material plastic fabricate prin tipărire 3D;

31. Rezolvarea unor probleme practice distincte a fost solicitată în cazul necesității de realizare a unui echipament necesar pentru studierea comportării la tracțiune a unor epruvete de tip inel, fabricate din materiale plastice, prin tipărire 3D. Lipsa unui echipament care să permită evaluarea rezistenței la tracțiune a epruvetelor menționate la valori relativ mici ale forțelor de tracțiune (ca urmare a luării în considerare a unor opinii ale unor specialiști în domeniul rezistenței materialelor, conform cărora, pentru valori ale forței de tracțiune mai mici de 10 % din valoarea maximă nominală a unei mașini-universale de încercare la tracțiune-compresiune, există probabilitatea apariției unor erori ale valorilor determinate pe cale experimentală), a fost conceput, materializat și testat un dispozitiv de încercare la tracțiune adaptabil pe un string universal;

32. A fost luată în considerare utilizarea, în efectuarea diferitelor cercetări experimentale, a unor echipamente și dispozitive produse de firme specializate, așa cum au fost mașina universală de încercare la tracțiune compresiune, un dispozitiv pentru determinarea durtății materialelor plastice, o cameră cu posibilități de preluare a unor imagini în infraroșu, a unui sonometru pentru măsurarea unor caracteristici ale undelor sonore, a unui rugozimetru. Pentru cercetarea experimentală a capacității de transmitere a căldurii, a fost conceput și realizat un echipament relativ simplu utilizabil în acest scop;

33. A fost luată în considerare utilizarea unor materiale plastice diferite pentru fabricarea prin tipărire 3D a unor epruvete destinate efectuării diferitelor categorii de încercări, în cele mai multe încercări recurgându-se la materialul de tip acid polilactic (PLA), dar, atunci când a fost formulată problema influenței pe care o exercită natura materialului plastic asupra unor proprietăți de exploatare a pieselor din materiale plastice, s-a optat și pentru folosirea altor materiale, așa cum sunt acrilonitril-butadien stirenul (ABS), polietilena tereftalată (PETG), polistirenul rezistent la impact (HIPS);

În ceea ce privește *concluziile rezultate din cercetările experimentale*, principalele asemenea concluzii au fost următoarele:

34. S-a constatat că este posibilă utilizarea unor metode care asigură condiții pentru minimizarea duratei și a numărului încercărilor experimentale, care permit stabilirea unor modele matematice empirice capabile să faciliteze evidențierea influenței diferiților factori de intrare asupra valorilor unor parametri de ieșire. Au fost introduse, ca atare, în teza de doctorat, informații succinte despre asemenea metode, în capitolul al cincilea, prin prezentarea metodei Taguchi și a planificării experimentale;

35. În frecvente cazuri, a fost preferată metoda planificării încercărilor experimentale, metodă ce face necesară efectuarea unor încercări experimentale pentru anumite combinații ale valorilor factorilor de intrare și asigură condiții pentru obținerea unui nivel acceptabil de încredere în modelele matematice empirice susceptibile a se obține. De menționat este faptul că în unele situații au fost folosite variante ale experimentelor factoriale planificate fracționar, așa cum au fost ele definite de către profesorul japonez G. Taguchi, în acest mod asigurându-se încă o reducere a numerelor de încercări experimentale necesar a fi efectuate și respectiv a duratei încercărilor experimentale;

36. S-a constatat că la baza utilizării metodei de planificare a încercărilor experimentale se află metoda celor mai mici pătrate, care este folosită pentru prelucrarea rezultatelor experimentale în conformitate cu anumite reguli din statistica matematică;

37. Pentru procesarea rezultatelor experimentale s-a folosit un program specializat de calculator care asigură condiții pentru determinarea a cinci modele matematice empirice distincte și anume a unor funcții de tip polinom de gradul întâi, polinom de gradul al doilea, funcție de tip putere, funcție exponențială și funcție hiperbolică. În calitate de criteriu pentru selectarea celui mai adecvat model matematic dintre cele 5 tipuri de modele disponibile, programul specializat de calculator ia în considerare valoarea, așa-numitului, criteriu al lui Gauss. Această valoare a criteriului lui Gauss se determină ca un raport în care numărătorul se calculează ca o sumă a pătratelor diferențelor dintre valorile determinate atunci când se folosește un anumit model matematic empiric, pe de o parte, și valorile obținute pe cale experimentală determinate prin folosirea aceluiași valori ale absciselor, pe de altă parte. Numitorul raportului menționat anterior se calculează ca o diferență între numărul încercărilor experimentale efectuate și numărul constantelor din respectivul model matematic. Cu cât valoarea criteriului lui Gauss calculată în modul descris anterior este mai mică, cu atât se consideră că modelul matematic empiric se află într-o corelație mai bună cu rezultatele experimentale luate în considerare la determinarea lui.

38. Folosind programul specializat de calculator, în cele mai dese cazuri au fost determinate modele matematice empirice caracterizate prin valorile minime al criteriului lui Gauss, dintre cele 5 tipuri de modele matematice empirice posibil a fi luate în considerare. Pe de altă parte, se cunoaște faptul că, în numeroase situații din ingineria fabricației, există preferința utilizării unor modele matematice empirice de tip funcție putere, asemenea modele permițând formularea unor observații directe privind evoluția parametrului de ieșire luat în considerare la variația factorilor de intrare, prin simpla examinare a valorilor exponenților atașați fiecărei variabile independente din modelul matematic empiric. O valoare pozitivă a exponentului înseamnă o creștere a valorii parametrului de ieșire la mărirea valorii factorului de intrare, în timp ce o valoare negativă a exponentului conduce la concluzia că o creștere a valorii factorului de intrare va avea drept efect o scădere a valorii parametrului de ieșire. Pe de altă parte, o comparare a valorilor absolute ale exponenților atașați variabilelor independente facilitează o ordonare a mărimilor influențelor factorilor de intrare, factorul căreia îi este atașată valoarea absolută maximă a exponentului fiind factorul cu influența cea mai mare asupra valorii parametrului de ieșire. Este însă de menționat că utilizarea unui model matematic de tip funcție putere implică adoptarea ipotezei că pentru intervalul de variație a mărimii factorului de intrare se va înregistra o variație monotonă a mărimii parametrului de ieșire, deci fără maxime sau minime ale parametrului de ieșire. Atunci când, în cadrul tezei, au fost adoptate modele matematice de tip funcție putere, s-a plecat deci de la premisa că există o variație monotonă a parametrului de ieșire, la modificarea valorilor factorilor de intrare luați în considerare;

39. Pe baza modelelor matematice empirice, au fost elaborate reprezentări grafice care să permită o ilustrare sugestivă a variației parametrilor de ieșire la modificarea valorilor factorilor de intrare și asemenea reprezentări grafice și modele matematice empirice au fost utilizate pentru formularea unor observații privind procesul experimental investigat;

40. În modul descris anterior, au fost elaborate modele matematice empirice care să evidențieze influența diferiților factori asupra variației dimensiunilor unor epruvete din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D asupra rezistenței la compresiune, asupra rezistenței la eroziunea prin abrazare, asupra capacității de izolare fonică, asupra durității materialului încorporat în epruvete, asupra rugozității suprafețelor generate prin tipărire 3D, asupra comportării la compresiune a unor epruvete sub forma unor corpuri sferice pline sau cave;

41. Rezultate ale cercetărilor experimentale, ca de altfel și ale cercetărilor teoretice, au fost utilizate în elaborarea unor lucrări științifice comunicate și publicate în contextul unor manifestări științifice din țară și de peste hotare sau a unor lucrări publicate în jurnale științifice. De asemenea, pentru unele dintre soluțiile constructive ale diferitelor echipamente utilizate în cadrul cercetărilor experimentale, s-a considerat că există anumite elemente de originalitate ale acestor soluții și au fost elaborate și înaintate către autoritatea competentă (Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci București) documentele specifice unor propuneri de invenții;

42. Autoarea tezei de doctorat a participat, în calitate de prim autor și de coautor, la elaborarea a 28 de lucrări științifice ale căror subiecte se află în conexiune cu tema tezei de doctorat, pentru 15 dintre aceste lucrări fiind prim autor. 17 dintre lucrările în care autoarea tezei de doctorat a contribuit în calitate de prim autor și coautor sunt lucrări cotate în baza de date Web of Science;

43. Într-o directă conexiune cu tema tezei de doctorat se află și subiectele abordate în cadrul a patru propuneri de invenții înaintate către OSIM București, pentru două dintre aceste propuneri autoarea tezei fiind înscrisă în calitate de prim autor;

44. În afara lucrărilor ale căror subiecte se află în directă conexiune cu tema tezei de doctorat, autoarea tezei de doctorat a colaborat, pe parcursul perioadei de studii doctorale, și la elaborarea altor lucrări și propuneri de invenții, fiind menționate, în liste distincte, 39 de asemenea lucrări (dintre care 12 lucrări au fost publicate în jurnale cotate în baza de date Web of Science) și, respectiv, 26 propuneri de invenții.

Contribuții personale

Autoarea tezei de doctorat apreciază că ar putea fi luate în considerare în calitate de contribuții personale următoarele aspecte:

1. Elaborarea unei sinteze documentare privind situația actuală și evoluția până în prezent a informațiilor științifice și tehnice privind influența exercitată de către diferiți factori asupra unor proprietăți de exploatare ale pieselor fabricate din materiale plastice prin tipărire 3D; această sinteză a stat la baza elaborării primului capitol al tezei;

2. Dezvoltarea unor considerații teoretice referitoare la procesul de tipărire 3D a unor piese și epruvete din unele materiale plastice, precum și aplicarea unor metode teoretice pentru cercetarea unor aspecte de detaliu referitoare la tema tezei de doctorat. S-a apelat, în acest sens, la metode teoretice, așa cum sunt metoda analizei sistemice, metoda diagramei Ishikawa, analiza SWOT, metoda diagramei de idei, proiectarea axiomatică, metoda analizei cu elemente finite. Unele dintre aceste metode teoretice, așa cum sunt metoda diagramei de idei și proiectarea axiomatică, au fost utilizate inclusiv pentru identificarea unor soluții îmbunătățite ale unor echipamente ce aveau să fie ulterior materializate și utilizate în cadrul cercetărilor experimentale;

3. Așa cum s-a menționat anterior, unele dintre cercetările referitoare la identificarea unor echipamente și dispozitive utilizabile în efectuarea cercetărilor experimentale au fost considerate ca prezentând elemente de originalitate și, ca atare, au fost elaborate documentele corespunzătoare unor propuneri de invenții. În directă conexiune cu tema tezei de doctorat au fost soluțiile tehnice referitoare la un echipament pentru studiul rezistenței la abraziune, un dispozitiv pentru studiul dilatării termice, un echipament pentru studiul capacității de izolare fonică a unor panouri de mici dimensiuni din materiale plastice, un element de structură mecanică din material compozit anizotrop;

4. Determinarea unor modele matematice empirice destinate să evidențieze sensurile de evoluție și influența diferiților factori asupra unor proprietăți fizico-mecanice sau de exploatare ale pieselor din materiale plastice fabricate prin tipărire 3D.

Direcții viitoare de cercetare

Desfășurarea cercetării documentare, a cercetărilor teoretice și a cercetărilor experimentale a condus la luarea în considerare a următoarelor direcții de cercetare posibil a fi abordate în viitor:

1. Efectuarea unor cercetări referitoare și la alte materiale plastice, în afara celor pe care asemenea cercetări au fost efectuate în perioada studiilor doctorale, cu atât mai mult cu cât există o tendință evidentă de creare și utilizare a unor materiale plastice noi sau cu proprietăți îmbunătățite în raport cu cele cunoscute în prezent;

2. Este posibilă extinderea numărului factorilor de intrare apreciați a exercita influență asupra proprietăților fizico-mecanice și de exploatare ale materialelor plastice încorporate în piese fabricate prin tipărire 3D;

3. Ultimii ani au consacrat o extindere semnificativă a metodelor și procedeele utilizabile pentru fabricarea de piese din materiale plastice prin tipărire 3D și este desigur posibil ca o parte dintre aceste procedee să conducă la proprietăți fizico-mecanice și de exploatare ale materialelor plastice diferite de cele realizabile prin procedee puse la punct cu mai mulți ani în urmă, așa cum a fost, de exemplu, metoda și procedeele de formare prin depunere din material topit; poate fi deci conturată ca o direcție de cercetare dezvoltarea unor cercetări teoretice și experimentale care să evidențieze diferențele generate prin utilizarea noilor metode și procedee de tipărire 3D în ceea ce privește proprietățile materialelor utilizate la fabricarea pieselor din materiale plastice în raport cu proprietățile specifice metodelor și procedeele de fabricare cunoscute de mai mult timp;

4. Identificarea și dezvoltarea de cercetări teoretice și experimentale prin luarea în considerare și a altor proprietăți fizico-mecanice de interes ale materialelor plastice incluse în piese fabricate prin tipărire 3D, așa cum sunt, de exemplu, capacitatea de reflectare a luminii, capacitatea de a permite trecerea radiațiilor electromagnetice etc.;

5. Dezvoltarea unor cercetări care să se refere în măsură mai mare la materialele compozite ce conțin materiale plastice și ale căror comportări în diferite condiții de exploatare sunt mai puțin cunoscute în prezent;

6. În cadrul cercetărilor ale căror rezultate sunt expuse în prezenta teză de doctorat au fost luate în considerare numai anumite categorii de solicitări mecanice (solicitări la întindere, la compresiune, la abraziune, etc.), dar gama categoriilor de solicitări mecanice este mult mai largă decât cele menționate și exploatate în cadrul studiilor doctorale și aceasta ar putea fi, de asemenea, o direcție de cercetare susceptibilă de abordare în viitor.

Bibliografie selectivă

- 1) BCN3D, *How to 3D print? The Beginner's Guide to 3D Printing*, 2020, disponibil la <https://www.bcn3d.com/the-beginners-guide-to-3d-printing-6-steps/>, accesat la data de 23.09.2021
- 2) Berce, P., Bâlc, N., Păcular, R., Brătean, S., Caizar, C., Radu, A.S., Fodorean, I., *Fabricația aditivă și aplicațiile lor*, Editura Academiei Române, București, 2014.
- 3) *Ce este prelucrarea CNC? - Prima clasă care înțelege prelucrarea CNC*, 2023, disponibil la <https://ro.metalcustomks.com/info/what-is-cnc-machining-the-first-class-to-un-90674588.html>, accesat la data de 27.05.2024.
- 4) Crăciun, E., Mihalache, A.M., Coteață, M., Hrițuc, A., Rîpanu, M.-I., Dodun, O., Nagiț, G., Slătineanu, L., *The influence of some factors on the size of the friction coefficient in the case of some test samples made of polymeric material and manufactured by 3d printing*, International conference RoTrib, 2024, Bucharest.
- 5) Crețu, G., *Bazele cercetării experimentale. Îndrumar de laborator*, "Gheorghe Asachi" Technical University of Iași, Romania, 1992.
- 6) Crețu, G., Vârvara, G., *Metode de cercetare experimentală în construcția de mașini*, Iași, Editura Junimea, 1999
- 7) Dodun, O., Caviq, M., Slătineanu, L., Dușa, P., *Using the axiomatic design in engineering*, Advances in Product Design Engineering, (eds.: Kyratsis, P., Efklidis, N., Davim, J.P.), Springer, 2022, 25-58.
- 8) Elkholy, A. și Kempers, R., *An accurate steady-state approach for characterizing the thermal conductivity of Additively manufactured polymer composites*, Proceedings of the CSME International Congress, Case Study in Thermal Engineering, 31, 101829, 2022, disponibil la <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101829>, accesat la data de 18.07.2022.
- 9) Ermolai, V., *Contribuții teoretice și experimentale privind obținerea pieselor multimaterial prin fabricație aditivă cu filament fuzibil (FFF)*, Teză de doctorat, Iași, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2023.
- 10) Falkonakis, I., Lotfian, S., Yeter, B., *Multi-criteria decision analysis of an innovative additive manufacturing technique for onboard maintenance*, Sustainability, 16, 3763, 2024.
- 11) Fasake, V., Shelake, P.S., Srivastava, A., Dashora, K., *Characteristics of Different Plastic Materials, Properties and their Role in Food Packaging*, Current Nutrition & Food Science, 17, 9, 944-954, 2021.
- 12) Flaata, T., Michna, G. J., Letcher, T., *Thermal Conductivity Testing Apparatus for 3D Printed Materials*, prezentat la ASME 2017, Summer Heat Transfer Conference, HT2017, Bellevue, Washington, USA, July, 2017, disponibil la <https://doi.org/10.1115/HT2017-4856>, accesat la data de 18.10.2022.
- 13) Feng, Z., Wang, H., Wang, C., Sun, X., Zhang, S., *Analysis of the Influencing Factors of FDM-Supported Positions for the Compressive Strength of Printing Components*, Materials, 24, Corpus ID: 236211891, 2021, disponibil la DOI:10.3390/ma14144008, accesat la data de 20.10. 2022.
- 14) Fetecău, C., *Injectarea materialelor plastice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2007.
- 15) Gaweł, T.G., *Review of additive manufacturing methods*, Solid State Phenomena, 308, 1-29, 2020.
- 16) Haftlang, F., Kim, E.S., Kim, H.S., *Crystallographic-Oriented-Dependent Magnetic Properties of Fe-Ni Permalloy in-Situ Alloyed Using Additive Manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, 309, 117733, 2022, disponibil la <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117733>, accesat la data de 05.03.2023.
- 17) Hayes, A., *Ishikawa Diagram*, 2023, disponibil la <https://www.investopedia.com/terms/i/ishikawa-diagram.asp>, accesat la data de 21.07.2023.
- 18) HP, *Introduction in 3D printing processes*, 2020, disponibil la <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/learning-center/3d-printing-process.html>, accesat la data de 15.07.2022.
- 19) Hrițuc, A., Slătineanu, L., Boca, M. A., Sover, A., Nagiț, G., Dodun, O., Coteață, M., Mihalache, A. M., *Abrasive erosion behavior of some plastic parts obtained by 3D printing*, Macromolecular Symposia, 396, 1, 2000288, 2021, a.
- 20) Hrițuc, A., Slătineanu, L., Mihalache A. M., Boca, A. M., *Echipament pentru studiul rezistenței la uzare*, Dosar OSIM, nr. A/00152/2021, 2021, b.
- 21) Hrițuc, A., Dodun, O., Mihalache, A. M., Nagiț, G., *Equipment requirements for the investigation of sound insulation properties of 3D printed polymeric materials*, Acta Technica Napocensis, Series Applied Mathematics, Mechanics and Engineering, 65, 4S, 1186–1192, , 2022, a, disponibil la <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2046>.

- 22) Hrițuc, A., Slătineanu, L., Mihalache, A. M., *Echipament pentru evaluarea capacității de izolare fonică a unor panouri de mici dimensiuni*, Dosar OSIM, nr. A/00831/2022, 2022, b.
- 23) Hrițuc, A., Slătineanu, L., Rîpanu, M. I., Mihalache, A. M., Nagîț, G., Dodun, O., *Tensile Strength Analysis of the Ring-Shape 3D Printed Polymer Parts*, Macromolecular Symposia, 404, 1, SI, 2100336, 2022, c, disponibil la DOI10.1002/masy.202100336.
- 24) Hrițuc, A., Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Dodun, O., Nagîț, G., *Heat transfer in 3D-printed polymer cylindrical parts*, Macromolecular Symposia, 411, 1, 2023, a, disponibil la DOI:10.1002/masy.202200187.
- 25) Hrițuc, A., Nagîț, G., Slătineanu, L., Dodun, O., Mihalache, A. M., *The sound insulation capacity of some panels made of polymeric materials manufactured by 3D printing*, Material Research Proceedings, Materials Research Forum LLC, 28, 2023, b.
- 26) Hrițuc, A., Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagîț, G., Beșliu-Băncescu, I., Rădulescu, B., Slătineanu, L., *Propagation of sounds through small panels made of polymer materials by 3D Printing*, Polymers, 16, 5, 2024, a, disponibil la <https://doi.org/10.3390/polym16010005>.
- 27) Hrițuc, A., Ermolai, V., Mihalache, A. M., Andrușcă, L., Dodun, O., Nagîț, G., Boca, A. M., Slătineanu, L., *Compressive Behavior of Some Balls Manufactured by 3D Printing from Ceramic-Polymer Composite Materials*, Micromachines, 15, 1, 150, 2024, b, disponibil la DOI10.3390/mi15010150
- 28) Jordan, J., *3D printing*, The MIT Press, Massachusetts, 2018.
- 29) Khaha, H. M., Soleimani, O., *Properties and applications of polymers: a mini review*, Journal of Chemical Reviews, 5, 2, 204-220, 2023.
- 30) Linke, R., *Additive manufacturing, explained*, 2017, disponibil la <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained/#:~:text=Additive%20manufacturing%20is%20the%20process,the%20final%20product%20is%20complete>, accesat: 27.05.2024, accesat la data de 20.10.2020.
- 31) Machado, T.O., Stubbs, C., Chiaradia, V., Alraddadi, M. A., Brandolese, A., Worch, J. C., Dove, A. P., *A renewably sourced, circular photopolymer resin for additive manufacturing*, Nature, 629, 1069-1076, 2024.
- 32) Mark, J., Ngai, K., Graessley W., Mandelkern, L., Samulski, E. Koenig, J., Wignall, G., *Physical Properties of Polymers*, Cambridge, Cambridge University Press, 2004.
- 33) Murariu, A. C., Sîrbu, N. A., Cocard, M., Duma, I., *Influence of 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of the PLA Parts Made by FDM Additive Manufacturing Process*, Engineering Innovations, 2, 7-20, 2022, disponibil la DOI:10.4028/p-4isiu8, accesat la data de 13.02.2023.
- 34) Norman, J., *Chuck Hull Invents Stereolithography or 3D Printing and Produces the First Commercial 3D Printer*, 2016, disponibil la <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=3864>, accesat la data de 20.07.2022.
- 35) PADT, *3D Printing Glossary*, 2022, disponibil la <https://www.sme.org/globalassets/sme.org/training/certifications/additive-manufacturing-certification/3d-printing-glossary.pdf>, accesat la data de 21.05.2023.
- 36) Pereira, T. F., Oliveira, M. F., Maia, I. A., Silva, J. V. L., Costa, M. F., Thiré, *3D Printing of Poly (3-hydroxybutyrate) Porous Structures Using Selective Laser Sintering*, Macromolecular Symposia, 319, 64-73, 2012, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.201100237>, accesa la data de 17.03.2021
- 37) Pillet, M., *Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi*, Paris, Les Éditions d'Organisation, 1992.
- 38) Plastics Europe, *Plastics Europe launches Plastics – the fast Facts 2023*, 2023, disponibil la <https://plasticseurope.org/media/plastics-europe-launches-the-plastics-the-fast-facts-2023/>, accesat la data de 12.01.2024.
- 39) Plastipol, *Why is plastic so widely used?*, 2023, disponibil la <https://plastipol.pl/en/why-is-plastic-so-widely-used/#:~:text=Plastic%20is%20commonly%20used%20due,from%20packaging%20to%20automotive%20parts>, accesat la data de 10.12.2023.
- 40) *Puterea imprimantelor 3D- Filamente*, 2024, disponibil la <https://www.smart.md/streamlining-production-with-filamente-3d-printers>, accesat la data de 27.05.2024.
- 41) Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Kumar, N. M., Abdullah, M. H., Reddy, G. R., *Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective*, Procedia Computer Science, 167, 1210-1219, 2020.
- 42) Raise. Raise 3D Academy, *3D Printing History: A Complete Timeline of Additive Manufacturing Technologies*, 2022, disponibil la <https://www.raise3d.com/academy/3d-printing-history/>, accesat la data de 16.05.2022.
- 43) Raise. Raise 3D Academy, *3D Printing Settings and Parameters*, 2023, disponibil la <https://www.raise3d.com/academy/3d-printing-settings-and-parameters/#:~:text=Mastering%203D%20printing%20settings%20transforms,determine%20object%20strength%20and%20efficiency>, accesat la data de 21.07.2024.

- 44) Rasiya, G., Shukla, A., Saran, K., *Additive Manufacturing-A Review*, Materials Today: Proceedings, 47, 6896–6901, 2021.
- 45) Rodriguez-Vargas, B. R., Stornelli, G., Folgarait, P., Ridolfi, M. R., Pérez, M. A. F., Di Schino, A., *Recent advances in additive manufacturing of soft magnetic materials: a review*, Materials, 16, 5610, 2023.
- 46) Simplify3d, *Filament Properties Table*, 2024, disponibil la <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/?highlight=pctg>, accesat la data de 18.07.2024.
- 47) SRN EN ISO 10534-1, *Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance with the interferometer. Part 1: Stationary wave ratio method*, 2002.
- 48) SRN EN ISO 10534-2, *Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance with the interferometer. Part 2: Transfer function method*, 2002.
- 49) STEMpedia, *3D Printing: What it is, Types, Applications, and Printers*, 2022, disponibil la <https://ai.thestempedia.com/docs/3d-printing/getting-started-with-3d-printing/>, accesat la data de 23.11.2022.
- 50) Suh N.P., *The principles of design*, University Press, Oxford, 1990.
- 51) Suh, N. P., *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford University Press, New York, 2001.
- 52) Suh, N. P., Cavique, M., Foley, J. (editors), *Design Engineering and Science*, Springer, 2021.
- 53) Sultanova, N. G., Kasarova, S. N., Nikolov, I. D., *Optical properties of plastic materials for medical vision applications*, Journal of Physics, Conference Series, 398, 012030, 2012.
- 54) Systems, *Our story*, 2018, disponibil la <https://www.3dsystems.com/our-story>, accesat la data de 10. 02.2021.
- 55) Itakeuchi, M., Pamalla, S., Roy, D., *Designing a professional e-portfolio to promote 3D printing-based entrepreneurial thinking as a case study: A technical writing project*, SHS Web of Conferences, ETLTC 2022, 139, 02007, 2022.
- 56) Taylor- Hobson, *Manual de utilizare pentru rugozimetru Surtronic 25*, disponibil la <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning-zone/user-guides/surtronic-25-user-guide/surtronic-25-issue-4-gb.pdf>, accesat la data de 10.01.2021.
- 57) van Krevelen, D. W., te Nijenhuis, K., *Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*, Elsevier, Science, 2009.
- 58) van der Leeden, M. C., Frens, G., *Surface properties of plastic materials in relation to their adhering performance*, Advanced Engineering Materials, 4, 5, 280-289, 2002,
- 59) Zhang, Z., *A review on additive manufacturing of wave controlling metamaterial*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124, 647–680, 2023.
- 60) Zhang, T., Jiang, F., Yan, L., Jiang, Z., Xu, X., *A novel ultrahigh-speed ball-on-disc tribometer*, Tribology International, 157, 106901, 2021.

Lista lucrărilor aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale

1. **Hrițuc**, A., Slătineanu, L. Mihalache, A., Dodun, O., Nagîț, G., *Accuracy of Polylactide Parts Made by 3D Printing*, Macromolecular Symposia, 2020, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.201900064>- **indexat WoS**.
2. **Hrițuc**, A., Mihalache, A., Mareș, M., Coteață, M., Dodun, O., Nagîț, G., Slătineanu, L., *Mechanical Behaviour of 3D Printed PLA Hollow Spherical Parts Under Axial Compression*, Materiale Plastice, 57, 1, 13-20, 2020 disponibil la <https://doi.org/10.37358/MP.20.1.5307> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.782**.
3. Mihalache, A., **Hrițuc**, A., Boca, M., Oroian, B., Condrea, I., Botezatu, C., Slătineanu, L. *Thermal Insulation Capacity of a 3D Printed Material*, Macromolecular Symposia, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.202000286> - **indexat WoS**.
4. **Hrițuc**, A., Slătineanu, L., Boca, M. A., Sover, A., Nagîț, G., Dodun, O., Coteață, M., Mihalache, A., *Abrasive Erosion Behavior of Some Plastic Parts Obtained by 3D Printing*. Macromolecular Symposia, 396, 2000288, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.202000288> - **indexat WoS**.
5. Mihalache, A. M., Nagîț, G., Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., Markopoulos, A., Dodun, O., *Evaluation of the Ability to Accurately Produce Angular Details by 3D Printing of Plastic Parts*, Machines, 9, 150, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.3390/machines9080150>- **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 2.899**.
6. Rîpanu, M. I., Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Mareș, M., Andrușcă, L., **Hrițuc**, A., Dodun, O., Nagîț, G., Coteață, M., Rădulescu, B., *Tensile Strength of Threaded Rods Made by 3D Printing of Polymeric Material*, Materiale Plastice, 58, 4, 9-18, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.37358/MP.21.4.5526> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.782**.

7. Panaite, C. E., Mihalache, A.-M., Dodun, O., Slătineanu, L., Popescu, A., **Hrițuc, A.**, Nagîț, G., *Theoretical, Numerical and Experimental Assessment of Temperature Response in Polylactic Acid and Acrylonitrile Butadiene Styrene Used in Additive Manufacturing*, Polymers, 14, 1714, 2022, disponibil la <https://doi.org/10.3390/polym14091714> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 5.0.**
8. Rădulescu, B., Mihalache, A. M., **Hrițuc, A.**, Rădulescu, M., Slătineanu, L., Munteanu, A., Dodun, O., Nagîț, G., *Thermal Expansion of Plastics Used for 3D Printing*, Polymers, 14, 15, 3061, 2022, disponibil la DOI10.3390/polym14153061 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 5.0.**
9. Mihalache, A., **Hrițuc, A.**, Slătineanu, L., Nagîț, G., Dodun, O., Ermolai, V., Panaite, E., *The Behavior of a 3D Printed Panel under Thermal Stress*, Macromolecular Symposia, 404, 1, SI, 2100332, 2022, disponibil la DOI10.1002/masy.202100332 - **indexat WoS.**
10. Panaite, C. E., Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Popescu, A., Nagîț, G., **Hrițuc, A.**, Dodun, O., *Numerical and Experimental Investigations of Thermal Conductivity of 3D Printed Polylactic Acid*, Macromolecular Symposia, 404, 1, SI, 2100338, 2022, disponibil la DOI10.1002/masy.202100338 - **indexat WoS**
11. **Hrițuc, A.**, Slătineanu, L., Rîpanu, M. I., Mihalache, A. M., Nagîț, G., Dodun, O., *Tensile Strength Analysis of the Ring-Shape 3D Printed Polymer Parts*, Macromolecular Symposia, 404, 1, SI, 2100336, 2022, disponibil la DOI10.1002/masy.202100336 - **indexat WoS.**
12. **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Mihalache, A.-M., Nagîț, G., *Equipment Requirements For The Investigation Of Sound Insulation Properties Of 3d Printed Polymeric Materials*, Acta Technica Napocensis Series- Applied Mathematics Mechanics And Engineering, 65, 4, 1185-1192, SI, 2022 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.06.**
13. Mihalache, A. M., Ermolai, V., Sover, A., Nagîț, G., Boca, M. A., Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Rîpanu, M.-I., *Tensile Behavior of Joints of Strip Ends Made of Polymeric Materials*, Polymers, 14, 22, 4990, 2022, disponibil la DOI10.3390/polym14224990 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 5.0.**
14. Ermolai, V., Sover, A., Boca, A. M., **Hrițuc, A.**, Slătineanu, L., Nagîț, G., Stavarache, R. C., *Mechanical Behaviour of Macroscopic Interfaces for 3D Printed Multi-material Samples*, MATEC Web Conference, 368, 01004, 2022, disponibil la DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236801004>
15. **Hrițuc, A.**, Slătineanu, L., Sover, A., Mihalache, A. M., Surugiu, I., Coteață, M., *Abrasion Resistance of Plastic Parts Manufactured By 3D Printing*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Machine constructions Section, 68, 1, 35-45, 2022.
16. **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Dodun, O., Nagîț, G., Rîpanu, M. I., *The influence of the cooling conditions and inclination of surfaces obtained by 3D printing on the roughness parameters*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1268, 1, 012013, 2022, IOP Publishing, disponibil la DOI 10.1088/1757-899X/1268/1/012013.
17. **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Dodun, O., Nagîț, G., *Empirical Modeling of Heat Transfer in Cylindrical Polymer Rods Manufactured by 3D Printing*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Machine constructions Section, 68, 4, 31-40, 2022.
18. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagîț, G., Coteață, M., Surugiu, I., *Use of principles from axiomatic design in the case of equipment for studying abrasion resistance*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1262, 1, 012015, 2022, IOP Publishing, disponibil la DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012015.
19. Rădulescu, B., Mihalache, A. M., Păduraru, E., **Hrițuc, A.**, Rădulescu, M. C., Slătineanu, L., Ermolai, V., *Tensile Behavior of Chain Links Made of Polymeric Materials Manufactured by 3D Printing*, Polymers, 15, 15, 3178, 2023, disponibil la DOI10.3390/polym15153178- **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 4.7.**
20. **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Slătineanu, L., Dodun, O., Nagîț, G., *Heat Transfer in 3D-Printed Polymer Cylindrical Parts*, Macromolecular Symposia, 411, 1, SI, 2200187, 2023, disponibil la DOI10.1002/masy.202200187 - **indexat WoS.**
21. **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Dușa, P., Mihalache, A. M., Nagîț, G., Slătineanu, L., *Identifying a Device for Tracking the Evolution of Thermal Transfer in 3D Printed Parts Using Principles from Axiomatic Design*, In: Puik, E., Cochran, D.S., Foley, J.T., Foith-Förster, P. (eds) Proceedings of the 15th International Conference on Axiomatic Design, ICAD 2023, Lecture Notes in Networks and Systems, 849, Springer, Cham, 2023, disponibil la https://doi.org/10.1007/978-3-031-49920-3_4.
22. **Hrițuc, A.**, Nagîț, G., Slătineanu, L., Dodun, O., Mihalache, A. M., *The sound insulation capacity of some panels made of polymeric materials manufactured by 3D printing*, Material Research Proceedings, Materials Research Forum LLC, 28, 2023.
23. **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagîț, G., Beșliu-Băncescu, I., Rădulescu, B., Slătineanu, L., *Propagation of Sounds through Small Panels Made of Polymer Materials by 3D Printing*, Polymers, 16, 1, 5, 2024, disponibil la DOI10.3390/polym16010005- **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 4.7.**
24. **Hrițuc, A.**, Ermolai, V., Mihalache, A. M., Andrușcă, L., Dodun, O., Nagîț, G., Boca, A. M., Slătineanu, L., *Compressive Behavior of Some Balls Manufactured by 3D Printing from Ceramic-Polymer Composite*

Materials, Micromachines, 15, 1, 150, 2024, disponibil la DOI10.3390/mi15010150- **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.0.**

25. **Hrițuc**, A., Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagiț, G., Slătineanu, L., *Sound Isolation Capacity of 3D Printed Polymeric Panel*, Macromolecular Symposia, 413, 3, 2300208, 2024, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.202300208> - **indexat WoS.**

26. Crăciun, E., Mihalache, A. M., **Hrițuc**, A., Coteață, M., Dodun, O., Nagiț, G., Rîpanu, M. I., Slătineanu, L., *Determination of the Friction Coefficient Magnitude in the Case of Polymer Samples Manufactured by 3D Printing*, Macromolecular Symposia, 413, 3, 2300204, 2024, disponibil la <https://doi.org/10.1002/masy.202300204> - **indexat WoS.**

27. **Hrițuc**, A., Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagiț, G., Slătineanu, L., *The influence of signal type and distance to the sound source on sound transmission through small 3D printed polymer panels*, Materials Research Proceedings, 41, 2506-2513, 2024, disponibil la DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903131-276>.

28. Nicolau, M., **Hrițuc**, A., Mihalache, A. M., Nagiț, G., Dusa, P., Craciun, E., Munteanu, A., Dodun, O., Slătineanu, L., *Perforation resistance of some materials in 3D printed parts*, Materials Research Proceedings, 41, 2514-2523, 2024, disponibil la DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903131-277>.

Lista lucrărilor care nu se află în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale

1. Dodun, O., Slătineanu, L., Nagiț, G., Mareș, M., **Hrițuc**, A., Coteață, M., Băncescu, I. B., *Mechanical Properties of Composites Reinforced with Textile*, Materiale Plastice, 57, 1, 21-27. 2020, disponibil la <https://doi.org/10.37358/MP.20.1.5308>- **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.782.**

2. Slătineanu, L., Dodun, O., Coteață, M., Nagiț, G., Băncescu, I. B., **Hrițuc**, A., *Wire Electrical Discharge Machining—A Review*, Machines, 8, 69, 2020, disponibil la <https://doi.org/10.3390/machines8040069> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 2.428.**

3. Nagiț, G., Dodun, O., Slătineanu, L., Rîpanu, M.I., Mihalache, A. M., **Hrițuc**, A., *Influence of some process input factors on the main dimensions of the grooves generated during the ball vibroburnishing*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 968, 1, 012007, 2020, IOP Publishing.

4. Slătineanu, L., Coteață, M., **Hrițuc**, A., Nagiț, G., Dodun, O., Grănescu, T., *De la grăbește-te încet, la pledoaria pentru încetinire*, Cucuteni-5000 Redivivus: Științe exacte și mai puțin exacte, 136-142, Simpozionul "Cucuteni - 5000 Redivivus: Științe exacte și mai puțin exacte", Editia 15, Chișinău, Moldova, 2020.

5. Slătineanu, L., Dodun, O., Coteață, M., Nagiț, G., **Hrițuc**, A., Beșliu-Băncescu, I., Munteanu, A., *Correlations between the values of some surface roughness parameters when abrasive jet machining*, Proceedings in Manufacturing Systems, Bucharest, 15, 1, 35-40, 2020, University "Politehnica" of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems Department and Association ICMAS, 2020.

6. Slătineanu, L., Mihalache, A. M., Andrușcă, L., **Hrițuc**, A., Coteață, M., Dodun, O., Nagiț, G., Beșliu, I., *Generation and compression testing of spherical wood bodies*, Wood Material Science & Engineering, 2021, disponibil la DOI: 10.1080/17480272.2021.1944308 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 2.3.**

7. **Hrițuc**, A., Slătineanu, L., Dodun, O., Nagiț, G., Coteață, M., Boca, M. A., Ermolai, V., *Sustainable Manufacture of Bearing Bushing Parts, Sustainability*, 13, 10777, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.3390/su131910777> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.889.**

8. Slătineanu, L., Oroian, B., Condrea, I., Botezatu, C., **Hrițuc**, A., Boca, M. A., Coteață, M., Dodun, O., *Elaboration of the initial requirements in the design activities*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1037, 1, 012002, IOP Publishing, 2021.

9. Coteață, M., Pop, N., Hurja, I.-I., Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., Beșliu-Băncescu, I., *Premises of identifying equipment for cutting by electrochemical machining*, Revista de Tehnologii Neconvenționale, 25, 4, 8-13, 2021.

10. Slătineanu, L., Coteață, M., Dodun, O., Nagiț, G., **Hrițuc**, A., Beșliu-Băncescu, I., Boca, A. M., *Locating Error when Clamping Workpiece between Centers*, MATEC Web of Conferences, 343, 03003, MSE, EDP Series, 2021, disponibil la <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134303003>.

11. Dodun, O., Slătineanu, L., Arcidiacono, G., Coteață, M., Nagiț, G., **Hrițuc**, A., *Selecting an alternative to solve a problem from several available alternatives*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1009, 012018, 2021, disponibil la doi:10.1088/1757-899X/1009/1/012018.

12. Slătineanu, L., Dodun, O., Nagiț, G., Dușa, P., Coteață, M., **Hrițuc**, A., Luca D., Carp, I., *Using the principles of axiomatic design in the development of bushing manufacturing technology*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1174, 012009, 2021, disponibil la Doi: 10.1088/1757-899X/1174/1/012009.

13. Olaru, S. C., Coteață, M., Nagiț, G., **Hrițuc**, A., Dodun O., Slătineanu, L., *Analysis of laser cut slots on different thickness steel plates*, ESAFORM 2021, Mini Symposia, MS10 (Non-Conventional Proceeding), 2021, URL : <https://popups.uliege.be/esiform21/index.php?id=2681>.

14. Olaru, S. C., Nagîț, G., Dodun O., Coteață, M., Slătineanu, L., Beșliu-Băncescu, I., Grănescu, T., **Hrițuc, A.**, *Device for the study of the punching process*, Tehnomus Conference, New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, 89-94, 2021.
15. Surugiu, I., Coteață, M., Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, *Influence of Input Factors on Certain Characteristics of the Electrochemical Engraving Process*, Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 35, 35, 2021.
16. Oroian, B., Slătineanu, L., Condrea, I., Botezatu, C., **Hrițuc, A.**, *Enclosure for Testing the Electromechanical Devices When Changing the External Conditions*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Machine constructions Section, 67, 4, 79-87, 2021.
17. Slătineanu, L., Rădulescu, B., Dodun, O., **Hrițuc, A.**, *Preliminary synthesis of a device for simulating the self-induced vibrations when cutting*, Proceedings in Manufacturing Systems, 16, 1, 13-20, University "Politehnica" of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems Department and Association ICMAS, 2021.
18. Slătineanu, L., Coteață, M., Bosoanca, G., Dodun, O., **Hrițuc, A.**, Beșliu-Băncescu, I., Mazuru, S., *Requirements and solutions for a device for wire electrical discharge machining*, Nonconventional Technologies Review, Romanian Association of Nonconventional Technologies, 2021, URI: <http://repository.utm.md/handle/5014/16717>.
19. Slătineanu, L., Coteață, M., Dodun, O., Nagîț, G., **Hrițuc, A.**, Beșliu-Băncescu, I., *Ways for determining the intermediate dimensions when designing the machining technology*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1018, 1, 012019, 2021, disponibil la doi: 10.1088/1757-899X/1018/1/012019.
20. Nagîț, G., Slătineanu, L., Dodun, O., Mihalache, A. M., Rîpanu, M.I., **Hrițuc, A.** *Influence of Some Microchanges Generated by Different Processing Methods on Selected Tribological Characteristics*, Micromachines, 13, 29, 2022, disponibil la <https://doi.org/10.3390/mi13010029> - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.4.**
21. Rădulescu, B., Mihalache, A. M., Rădulescu, M., Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Nagîț, G., Coteață, M., *Selection of a method for machining an archimedean spiral groove*, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING, Section 1, 65, 1S, 2022, ISSN 2393-2988 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.06.**
22. Dodun, O., Slătineanu, L., Nagîț, G., **Hrițuc, A.**, Mihalache, A. M., Beșliu-Băncescu, I., *WEDM-Generated Slot Width Variation Modeling*, Micromachines, 13, 8, 1231, 2022, disponibil la DOI10.3390/mi13081231 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.4.**
23. Slătineanu, L., Coteață, M., Dodun, O., Cioata, F., Munteanu, A., **Hrițuc, A.**, Nagîț, G., Mihalache, A.M., *Ergonomic Approach To Teaching Online Activity Using Principles Of Axiomatic Design*, Acta Technica Napocensis Series-Applied Mathematics Mechanics And Engineering, 65, 3, 843-852, SI, 2022 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.06.**
24. Hurja, I. I., Bârsănescu, P., Munteanu, A., Mihalache, A. M., **Hrițuc, A.**, Achîței, D. C., Slătineanu, L., *Highlighting The Presence Of Residual Stresses In Ring-Shaped Metallic Test Samples*, Acta Technica Napocensis Series-Applied Mathematics Mechanics And Engineering, 65, 4, 1193-1200, 2022, SI - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 0.06.**
25. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Nagîț, G., Beșliu-Băncescu, I., *Obtaining one-sheeted revolution hyperboloid surface by cutting*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1235, 1, 012014, 2022.
26. Slătineanu, L., Coteață, M., **Hrițuc, A.**, Beșliu-Băncescu, I., Dodun, O., *Information-Seeking in Education for Creative Solving of Design and Engineering Problems*, Designs, 7, 1, 22, MDPI, 2023.
27. Slătineanu, L., Coteață, M., **Hrițuc, A.**, Dodun, O., Nagîț, G., *The use of some principles from axiomatic design in the case of an equipment for the study of electrochemical machining*, Revista de Tehnologii Neconvenționale, 26, 3, 28-33, Romanian Association for Nonconventional Technologies (ARTN), 2022.
28. Rădulescu, B., Slătineanu, L., Rădulescu, M., **Hrițuc, A.**, *Surface roughness when turning one-sheeted revolution hyperboloid surface*, Proceedings in Manufacturing Systems, 17, 1, 17-22, University „Politehnica” of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems Department and Association ICMAS, 2022, ISSN 2067-9238.
29. Slătineanu, L., Coteață, M., **Hrițuc, A.**, *Părăsirea cuibului străbun*, Cucuteni-5000 Redivivus: Științe exacte și mai puțin exacte, 287-296, 2022.
30. Nagîț, G., Slătineanu, L., Dodun, O., Păunoiu, V., Mihalache, A. M., Rîpanu, M. I., **Hrițuc, A.**, Surugiu, I., *The Influence of Lubrication on the Roughness of the Vibroburnished Surface*, MATEC Web of Conferences, 368, 01002, EDP Sciences, 2022.
31. Surugiu, I., **Hrițuc, A.**, Ermolai, V., Boca M. A., *Observații privind realizarea unor piese din oțeluri de damasc*, Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor, 1, 664-668, 2022.
32. Bișog, C., Țibuleac, A.-M., Filip, M., Mircea, F.-G., **Hrițuc, A.**, *Corelația dintre duritatea materialului probei și înălțimea de ridicare a unei bile după impactul cu suprafața probei*, Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor, 1, 605-609, 2022.

33. **Hrițuc**, A., Mihalache, A. M., Dodun, O., Slătineanu, L., Nagiț, G., *Evaluation of Thin Wall Milling Ability Using Disc Cutters*, Micromachines, 14, 2, 341, 2023, disponibil la DOI10.3390/mi14020341 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.0.**
34. Nagiț, G., Mihalache, A. M., Dodun, O., **Hrițuc**, A., Slătineanu, L., Merticaru, V., *Change in Time of the Value of Dry and Lubricated Friction Coefficients for Surfaces Generated by Different Processing Methods*, Lubricants, 11, 10, 436, 2023, disponibil la DOI10.3390/lubricants11100436 - **cotat ISI - factorul de impact al jurnalului: 3.1.**
35. Ciobanu, D., Nagiț, G., Dodun, O., **Hrițuc**, A., Crăciun, E., Slătineanu, L., *The influence of some working conditions on roughness in electrochemical machining of some carbon steel workpieces*, Nonconventional Technologies Review/Revista de Tehnologii Neconvenționale, 27, 4, 42, 2023, ISSN 2359-8646
36. Surugiu, I., Coteață, M., Jureschi, S., **Hrițuc**, A., Crăciun, E., Beșliu-Băncescu, I., Grămescu, T., Slătineanu, L., *Using the rank correlation method for ordering the factors influencing the results of some wear tests*, Tehnomus, New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, 9-14, 2023.
37. Rădulescu, B., Pană, A., Rădulescu, M., **Hrițuc**, A., Munteanu, A., Mihalache, A. M., Dodun, O., Nagiț, G., Slătineanu, L., *Evaluation on a lathe of circularity deviation and factors that could affect its measurement accuracy*, Proceedings in Manufacturing Systems, 18, 1, 13-18, University „Politehnica” of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems Department and Association ICMAS, 2023.
38. Boca, M., **Hrițuc**, A., Șover, A., Nagiț, G. *Reglarea sistemului tehnologic și asigurarea calității la fabricarea prin injecție a pieselor din materiale plastice. În aplicații de ingineria fabricației* (capitol în Slătineanu et al., 2021), Iași, Editura PIM, 309-322, 2021.
39. Nagiț, G., Mihalache, A. M., Beșliu-Băncescu, I., Dodun, O., Andrușcă, L., **Hrițuc**, A., Olaru, S. C., Slătineanu, L., *Punching Accuracy in the Case of Square-Shaped Holes*, Machines, 12, 8, 507, MDPI, 2024, disponibil la <https://doi.org/10.3390/machines12080507>.

Propuneri de invenție aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale

1. **Hrițuc**, A., Slătineanu, L., Mihalache A.M., Boca M., *Echipament pentru studiul rezistenței la uzare*, Dosar OSIM, nr. A/00152/2021.
2. Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., Coteață, M., Boca, M.A., *Element de structură mecanică din material compozit anizotrop*, Dosar OSIM, nr. A/00013/2020
3. Slătineanu, L., Rădulescu, B., **Hrițuc**, A., Mihalache, A. M., Rădulescu, M., *Dispozitiv pentru studiul dilatarei termice*, Dosar OSIM, nr. A/00274/2022.
4. **Hrițuc**, A., Slătineanu, L., Mihalache, A.M., *Echipament pentru evaluarea capacității de izolare fonică a unor panouri de mici dimensiuni*, Dosar OSIM, nr. A/00831/2022.
5. Boca M.-A., Slătineanu L., **Hrițuc** A., Ermolai V., *Echipament pentru realizarea unor încercări mecanice*, Dosar OSIM, nr. A/00274/2023.
6. Slătineanu L., **Hrițuc** A., Dodun-Des-Perrieres O., Mihalache M.-A., Crăciun E., Nicolau (Gervescu) M., *Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la perforare*, Dosar OSIM, nr. A/00129/2024.
7. Crăciun E., Coteață M., **Hrițuc** A., Mihalache M.-A., Slătineanu L., *Dispozitiv pentru determinarea mărimii coeficientului de frecare de alunecare*, A/00194/2024.

Propuneri de invenție care nu sunt aflate în conexiune cu tema tezei de doctorat și la elaborarea cărora autoarea tezei a contribuit, în perioada studiilor doctorale

1. Slătineanu, L., Dodun, O., Coteață, M., Nagiț, Gh., Băncescu-Beșliu I., **Hrițuc**, A., *Dispozitiv pentru studiul comportării vârfurilor conice sub acțiunea descărcărilor electrice*, Dosar OSIM, nr. A/00878/2020.
2. Slătineanu, L., Condrea, I., **Hrițuc**, A., Beșliu-Băncescu, I., Coteață, M., Oroian, B., *Sculă combinată pentru frezarea și prelucrarea prin deformare plastică superficială a suprafețelor plane*, dosar OSIM, nr. A/00350/2020.
3. Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., Oroian, B., Mihalache, A. M., *Capac pentru cutie răcitor-încălzitor*, Dosar OSIM, nr. A/00834/2020.
4. Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., *Mandrină cu vârf de centrare și bucsă elastică*, Dosar OSIM, nr. A/00153 2021.
5. Slătineanu, L., **Hrițuc**, A., Frigură, G., *Dispozitiv pentru frezarea suprafețelor hiberboloidale*, Dosar OSIM, nr. A/00637/2021.

6. Ciobanu D.- G., Slătineanu L., Nagiț Gh., **Hrițuc A.**, *Dispozitiv pentru oscilarea unui electrod la prelucrarea prin eroziune electrochimică*, Dosar OSIM, nr. A/00327/2021.
7. Slătineanu, L., Rădulescu, B., Rădulescu, M., **Hrițuc, A.**, *Dispozitiv pentru simularea dezvoltării autovibrațiilor la strunjire*, Dosar OSIM, nr. A/00411/2021.
8. Slătineanu, L., Botezatu, C., **Hrițuc, A.**, Condrea, I., *Echipament pentru studiul comportării materialelor metalice în cadrul unui proces de eroziune chimică*, Dosar OSIM, nr. A/00414/2021.
9. Slătineanu, L., Olaru S., Nagiț G., **Hrițuc A.**, *Dispozitiv pentru studiul procesului de tăiere prin ștanțare*, Dosar OSIM, nr. A/00447/2021.
10. Slătineanu, L., Cioata, F., **Hrițuc, A.**, Munteanu, A., Mihalache, A., *Echipament pentru predare online*, Dosar OSIM, nr. A/00374/2022.
11. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Boca, M., *Baterie pentru chiuveță*, Dosar OSIM, nr. A/00397/2022.
12. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Coteață, M., *Dispozitiv de prelucrat electrochimic*, Dosar OSIM, nr. A/00615/2022.
13. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Mihalache, A.M., *Epruvetă pentru evidențierea capacității de obținere prin așchiere a unor pereți plani subțiri*, Dosar OSIM, nr. A/00830/2022.
14. Slătineanu, L., **Hrițuc, A.**, Bișog, C., Tibuleac, A., Filip, M., *Echipament pentru determinarea înălțimii de ridicare a unei bile după impactul cu o probă din material metalic*, Dosar OSIM, nr. A/00059/2023.
15. Pană A.-M., Rădulescu M., Mihalache A.-M., **Hrițuc A.**, Munteanu A., Păduraru E., Slătineanu L., *Dispozitiv pentru studiul mărimii abaterii de la forma circulară*, Dosar OSIM, nr. A/00253/2023.
16. Crăciun E., Coteață M., Mihalache A. M., **Hrițuc A.**, Slătineanu L., *Dispozitiv pentru urmărirea evoluției forței axiale la găurirea prin fricțiune*, Dosar OSIM, nr. A/00276/2023.
17. Slătineanu L., Nicolau (Gervescu) M., Dodun-Des-Perrieres O., **Hrițuc A.**, Mihalache M.-A., *Pantaloni de pijama*, Dosar OSIM, nr. A/00538/2023.
18. Slătineanu L., **Hrițuc A.**, Mihalache M.-A., Crăciun E., *Dispozitiv pentru obținerea danturii în arc de cerc pe roți cilindrice*, Dosar OSIM, nr. A/00128/2024.
19. Mihalache M.-A., **Hrițuc A.**, Dodun-Des-Perrieres O., Nagiț G., Slătineanu L., *Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la rupere a dinților unei roți dințate cilindrice*, Dosar OSIM, nr. A/00257/2024.