



MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680, Ploiești, România, www.upg-ploiesti.ro

Telefon +40 244 573 171

Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT

UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI

DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND CALITATEA COMPONENTELOR REALIZATE PRIN TEHNOLOGII ADITIVE UTILIZATE LA FABRICAREA ANGRENAJELOR

Autor: Ing. Gheorghe (Portoacă) Alexandra-Ileana

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE

Ploiești 2024

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND CALITATEA COMPONENTELOR REALIZATE PRIN TEHNOLOGII ADITIVE UTILIZATE LA FABRICAREA ANGRENAJELOR STUDIES AND RESEARCH ON THE QUALITY OF COMPONENTS MADE THROUGH ADDITIVE TECHNOLOGIES USED IN GEARS MANUFACTURING

Autor: Ing. Gheorghe (Portoacă) Alexandra-Ileana

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE

Nr. Decizie 482 din 10.06.2024

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf. univ. dr. ing. Marius BĂDICIOIU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof. univ. dr. ing. Dan Mihai CONSTANTINESCU	de la	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București
Referent oficial	Prof. univ. dr. ing. Vasile NĂSTĂSESCU	de la	Academia Tehnică Militară București
Referent oficial	Prof. univ. habil. dr. ing. Răzvan George RÎPEANU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Ploiești 2024

Cuprins

Listă de figuri.....	i
Listă de tabele.....	iv
Introducere.....	3
1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive.....	13
1.1. Noțiuni și elemente de bază privind fabricația aditivă.....	13
1.2. Scurt istoric al fabricației aditive din punctul de vedere al evoluției pe piața internațională.....	14
1.3. Domenii de utilizare.....	15
1.4. Comparatie între fabricația clasică și fabricația aditivă.....	18
1.5. Tendințe pe plan mondial în domeniul fabricației aditive.....	20
1.6. Evaluarea comparativă a tehnologiilor de fabricație aditivă.....	21
1.7. Concluzii.....	30
2. Obiectivele tezei de doctorat.....	32
3. Caracterizarea procesului de fabricare prin metoda FDM	34
3.1. Materiale utilizate în fabricația aditivă pentru aplicații în inginerie	34
3.2. Stabilirea parametrilor de lucru ai procedeului de printare prin extrudarea materialelor termoplastice (FDM).....	39
3.3. Tehnologia de fabricare prin metoda FDM - aplicație – roată dințată.....	41
3.3.1. Aspecte generale privind construcția și funcționarea pieselor din clasa roților dințate	41
3.3.2. Caracteristicile de calitate ale pieselor din clasa roților dințate..	42
3.3.3. Stabilirea caracteristicilor fizico-chimice și mecanice ale materialelor utilizate.....	43
3.3.4. Descrierea instalației de lucru-imprimanta Raise Touch 3D.....	44
3.3.5. Elaborarea modelului CAD.....	48
3.3.6. Stabilirea parametrilor de lucru utilizați pentru printare.....	49
3.4. Concluzii.....	50
4. Cercetări teoretice și experimentale privind caracteristicile procesul de printare 3D în scopul realizării epruvetelor de încercare.....	53
4.1. Analiza tipurilor de materiale utilizate pentru fabricarea epruvetelor.....	53
4.1.1. Caracterizarea materialelor pe baza datelor furnizate de producător.....	53
4.1.2. Planul cercetărilor experimentale.....	54
4.2. Cercetări teoretice și experimentale privind parametrii de lucru ai procesului de printare a epruvetelor de încercare.....	54
4.2.1. Viteza de depunere.....	54
4.2.2. Direcția de depunere.....	55
4.2.3. Grosimea stratului depus.....	55
4.2.4. Procentul de umplere.....	55
4.2.5. Interpretarea rezultatelor obținute.....	57
4.3. Cercetări teoretice și experimentale privind modelarea și printarea tipurilor epruvetelor de încercare.....	58
4.3.1. Epruvete pentru încercarea la tracțiune.....	59
4.3.2. Epruvete pentru încercarea la compresiune.....	62
4.3.3. Epruvete pentru determinarea durității.....	64

4.3.4.	Epruvete pentru încercarea rezistenței la încovoiere.....	65
4.3.5.	Epruvete pentru încercarea la încovoiere prin șoc.....	67
4.3.6.	Epruvete pentru încercarea la oboseală.....	68
4.4.	Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice ale epruvetelor de încercare printate 3D	69
4.4.1.	Cercetarea microgeometriei materialului depus.....	70
4.4.2.	Determinarea durității materialului.....	88
4.4.3.	Determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la tracțiune	94
4.4.4.	Determinarea caracteristicilor mecanice la solicitarea la compresiune.....	111
4.4.5.	Determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la încovoiere prin șoc.....	122
4.4.6.	Determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la încovoiere.....	122
4.4.7.	Determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la oboseală.....	127
4.5.	Concluzii.....	129
5.	Cercetări teoretice și experimentale privind determinarea stărilor de tensiuni ale roților dințate fabricate prin metoda FDM	141
5.1.	Stabilirea datelor de bază.....	141
5.1.1.	Stabilirea datelor de proiectare ale roții dințate	141
5.1.2.	Calculul de rezistență al roții dințate.....	142
5.2.	Cercetări privind solicitările mecanice ale roților dințate utilizând metoda elementului finit (MEF).....	144
5.2.1	Modelarea geometrică.....	145
5.2.2	Stabilirea proprietăților de material și a caracteristicilor geometrice.....	145
5.2.3	Discretizarea modelului cu tipul de elemente finite adecvate.....	145
5.2.4	Impunerea condițiilor la limită și a solicitărilor.....	147
5.2.5	Analiza și postprocesarea rezultatelor.....	149
5.2.6	Interpretarea rezultatelor.....	149
5.3.	Încercări experimentale de rupere a dinților roților dințate fabricate prin metoda FDM	156
5.3.1.	Stabilirea metodologiei de încercare.....	156
5.3.2.	Stabilirea caracteristicilor epruvetelor de încercare tip roată dințată.....	156
5.3.3.	Dispozitiv de încercare la rupere a dinților roților dințate ..	157
5.3.4.	Determinări experimentale.....	158
5.3.5.	Interpretarea rezultatelor.....	160
5.4.	Concluzii.....	162
6.	Cercetări experimentale privind determinarea uzurii roților dințate fabricate prin metoda FDM.....	169
6.1.	Scopul cercetărilor experimentale.....	169
6.2.	Stabilirea caracteristicilor epruvetelor de încercare tip roată dințată.....	169
6.3.	Stabilirea datelor de bază ale angrenajului studiat.....	171

6.3.1.	Stabilirea caracteristicilor materialelor utilizate.....	171
6.3.2.	Stabilirea caracteristicile geometrice ale angrenajului.....	171
6.3.3.	Stabilirea momentul de torsiune aplicat.....	172
6.4.	Proiectarea și realizarea instalației de încercare destinată cercetării comportării angrenajului	173
6.4.1.	Descrierea instalației de încercare.....	173
6.4.2.	Metodologia încercărilor experimentale.....	174
6.4.3.	Determinări experimentale.....	175
6.4.4.	Interpretarea rezultatelor.....	179
6.5.	Concluzii.....	183
7.	Concluzii generale. Contribuții personale. Direcții viitoare de cercetare.....	187
7.1.	Concluzii generale.....	187
7.2.	Contribuții personale.....	207
7.3.	Direcții viitoare de cercetare.....	209
	BIBLIOGRAFIE.....	210
	LISTA PUBLICAȚIILOR.....	226
	ANEXE.....	228
ANEXA 1	Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul PLA.....	228
ANEXA 2	Parametrii microgeometrici pentru materialul PLA.....	231
ANEXA 3	Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul PLA-TT.....	240
ANEXA 4	Parametrii microgeometrici pentru materialul PLA-TT.....	243
ANEXA 5	Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul ABS.....	252
ANEXA 6	Parametrii microgeometrici pentru materialul ABS.....	255
ANEXA 7	Valorile rezistenței de rupere la tracțiune pentru PLA, ABS și PLA-TT.....	264
ANEXA 8	Curbele de material determinate prin încercarea la tracțiune...	265
ANEXA 9	Valorile tensiunilor de compresiune pentru PLA, ABS și PLA-TT.....	271
ANEXA 10	Diagramele tensiune-deformație pentru epruvetele testate la compresiune.....	272
ANEXA 11	Valorile medii ale energiei de impact absorbită.....	274
ANEXA 12	Valorile medii ale tensiunilor de încovoiere.....	275
ANEXA 13	Valorile medii ale uzurii gravimetrice ale roților dințate....	276
ANEXA 14	Curba uzurii pentru materialul PLA.....	277
ANEXA 15	Curba uzurii pentru materialul PLA-TT.....	280
ANEXA 16	Curba uzurii pentru materialul ABS.....	283

Listă de figuri

Capitolul 1

Fig. 1.1 Evoluția tehnologiilor aditive	14
Fig. 1.2 Tehnologia Hull [2]	15
Fig. 1.3 Evoluția tehnicii de la prima la a patra revoluție industrială [7]	15
Fig. 1.4 Utilizarea tehnologiilor aditive în diverse sectoare de activitate [7]	16
Fig. 1.5 Scaun de mașina printat 3D [7]	16
Fig. 1.6 Cauciuc imprimat 3D [7]	16
Fig. 1.7 Implant imprimat 3D din polimeri [8]	16
Fig. 1.8 Proteză umană imprimată	16
Fig. 1.9 Duză [11]	17
Fig. 1.10 Sapă de foraj confecționată prin tehnologii AM [11]	17
Fig. 1.11 Motoare cu piese imprimate ce echipază avioanele Airbus [11]	17
Fig. 1.12 Cameră de combustie imprimată 3D, SuperDraco [7]	17

Capitolul 3

Fig. 3.1 Domeniile în care sunt utilizate roțile dințate [130]	41
Fig. 3.2 Operațiile de degroșare și de finisare ale roților dințate [131]	42
Fig. 3.3 Prelucrări finale ale roților dințate [131]	42
Fig. 3.4 Tipurile de materiale utilizate în tehnologiile aditive [13,135]	44
Fig. 3.5 Imprimanta Raise 3D și elementele componente	45
Fig. 3.6 Ecranul tactil al imprimantei Raise 3D [139]	46
Fig. 3.7 Interfața "Vizualizare parametri" [139]	47
Fig. 3.8 Interfața "Deplasare axe" [139]	47
Fig. 3.9 Interfața "Nivelare platformă" [139]	47
Fig. 3.10 Interfața "Încărcare filament" [139]	47
Fig. 3.11 Interfața de nivelare automată a platformei de construcție [139]	47
Fig. 3.12 Interfața de printare [139]	47
Fig. 3.13 Elementele geometrice ale roții dințate printată 3D	48
Fig. 3.14 Setările utilizate pentru procesul de imprimare 3D, softul IdeaMaker	49
Fig. 3.15 Imprimanta Raise E2 [139]	49

Capitolul 4

Fig. 4.1 Orientări și unghiuri de printare [144]	55
Fig. 4.2 Influența parametrilor de proces asupra proprietăților de tracțiune [150]	56
Fig. 4.3 Epruvetă de încercare la tracțiune - formă și dimensiuni [151]	59
Fig. 4.4 Reprezentarea epruvetei în software-ul IdeaMaker și metoda de umplere liniară	60
Fig. 4.5 Încercarea la tracțiune a epruvetelor	60
Fig. 4.6 Încercarea la tracțiune pentru determinarea deformațiilor specifice longitudinale și transversale	61
Fig. 4.7 Montajul mărcilor tensometrice	61
Fig. 4.8 Poziționarea mărcilor tensometrice	61
Fig. 4.9 Caracteristicile geometrice ale epruvetei de testare la compresiune	62
Fig. 4.10 Aspectul epruvetelor de compresiune imprimate 3D	62
Fig. 4.11 Poziționarea punctelor pentru determinarea durității	64
Fig. 4.12 Determinarea durității	65
Fig. 4.13 Modelul CAD al epruvetei de încercare la încovoiere	65
Fig. 4.14 Încercarea la încovoiere	66
Fig. 4.15 Încercarea rezistenței la încovoiere prin șoc	67
Fig. 4.16 Seturi de epruvete pentru încercarea de încovoiere prin șoc	68
Fig. 4.17 Forma și dimensiunile epruvetei pentru încercarea de oboseală	68
Fig. 4.18 Set de epruvete pentru încercarea la oboseală	68
Fig. 4.19 Încercarea la oboseală	69
Fig. 4.20 Epruvete din material PLA	70
Fig. 4.21 Epruvete din material ABS	70
Fig. 4.22 Epruvete tratate termic – material PLA	71

Fig. 4.23 Tribometrul pin-on-disc THT CSM Instruments	72
Fig. 4.24 Profilometrul Surtronic 3+	72
Fig. 4.25 Corelația dintre coeficienții de frecare și parametrii de rugozitate pentru materialul PLA și PLA-TT	74
Fig. 4.26 Corelația dintre coeficienții de frecare și parametrii de rugozitate pentru materialul ABS	75
Fig. 4.27 Variația coeficientului de frecare în funcție de parametrii de proces pentru materialul PLA	76
Fig. 4.28 Variația coeficientului de frecare în funcție de parametrii de proces pentru materialul PLA-TT	76
Fig. 4.29 Variația coeficientului de frecare în funcție de parametrii de proces pentru materialul ABS	77
Fig. 4.30 Uzura liniară cumulată pentru epruvetele din materialul PLA	77
Fig. 4.31 Uzura liniară cumulată pentru epruvetele din materialul PLA-TT	78
Fig. 4.32 Uzura liniară cumulată pentru epruvetele din materialul ABS	78
Fig. 4.33 Etapele modelării statistice de tip DOE.....	79
Fig. 4.34. Histogramele parametrilor de profil ale suprafeței epruvetei	82
Fig. 4.35 Efectul factorilor semnificativi corespunzător procesului de analiză a rezultatelor cercetărilor, pentru materialul PLA.....	85
Fig. 4.36 Diagramele de contur ale coeficienților de frecare pentru materialele: a) PLA; b) PLA-TT; c) ABS	86
Fig. 4.37 Graficele soluțiilor optime: a) PLA; b) PLA-TT; c) ABS.....	87
Fig. 4.38 Dependența dintre valorile medii ale durităților în funcție de tipul materialul și parametrii de proces	89
Fig. 4.39 Diagramele Pareto - influența parametrilor de imprimare asupra durității materialelor	90
Fig. 4.40 Diagramele factorilor semnificativi care influențează duritatea materialelor.....	91
Fig. 4.41 Graficele de contur ale durităților pentru materialele: a – PLA; b – ABS; c – PLA-TT	93
Fig. 4.42 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA	94
Fig. 4.43 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	94
Fig. 4.44 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	95
Fig. 4.45 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA	95
Fig. 4.46 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	95
Fig. 4.47 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	95
Fig. 4.48 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA	96
Fig. 4.49 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	96
Fig. 4.50 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 25\%$; 50%; 75%; 100% - PLA.....	96
Fig. 4.51 Ruperea epruvetelor din PLA.....	97
Fig. 4.52 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS.....	99
Fig. 4.53 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100%) - ABS	99
Fig. 4.54 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS.....	99
Fig. 4.55 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	99
Fig. 4.56 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	99
Fig. 4.57 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	99
Fig. 4.58 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	100
Fig. 4.59 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	100
Fig. 4.60 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% - ABS	100
Fig. 4.61 Ruperea epruvetelor din ABS	100
Fig. 4.62 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT	101
Fig. 4.63 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	101
Fig. 4.64 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,1$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	102
Fig. 4.65 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT	102
Fig. 4.66 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT	102
Fig. 4.67 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	102
Fig. 4.68 Dependența $R_m = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	103
Fig. 4.69 Dependența $\epsilon = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	103
Fig. 4.70 Dependența $E = f(G_s)$, pentru $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$; 75%; 100% – PLA-TT.....	103
Fig. 4.71 Diagramele efectelor factorilor principali asupra rezistenței de rupere la tracțiune.....	105
Fig. 4.72 Diagramele Pareto cu influența grosimii stratului și a procentului	105
Fig. 4.73 Diagramele de contur ale rezistenței de rupere la tracțiune	106
Fig. 4.74 Diagramele Pareto cu influența grosimii stratului și a procentului de umplere asupra alungirii la rupere....	107
Fig. 4.75 Diagramele de contur ale alungirii la rupere	108
Fig. 4.76 Diagramele Pareto cu influența grosimii stratului și a procentului de umplere asupra lui E.....	109
Fig. 4.77 Diagramele de contur ale modulului de elasticitate	110
Fig. 4.78 Seturi de epruvete supuse la încercarea de compresiune.....	112
Fig. 4.79 Diagrama tensiune-deformație a materialului PLA	113

Fig. 4.80 Diagramele efectelor factorilor semnificativi asupra tensiunilor de compresiune	114
Fig. 4.81 Diagramele Pareto cu influența grosimii stratului și a procentului de umplere asupra lui R_{comp}	115
Fig. 4.82 Diagramele de contur ale tensiunilor de compresiune	116
Fig. 4.83 Seturi de epruvete supuse la încercarea de încovoiere prin șoc	117
Fig. 4.84 Energia de rupere absorbită (ET) la încercarea la încovoiere prin șoc a epruvetelor confecționate din PLA, PLA-TT și ABS	118
Fig. 4.85 Efectul factorilor semnificativi asupra energiei de rupere absorbită	119
Fig. 4.86 Diagramele Pareto cu influența efectelor factorilor semnificativi asupra energiei de rupere absorbită ...	120
Fig. 4.87 Diagramele de contur cu influența efectelor factorilor semnificativi asupra energiei de rupere absorbită.....	121
Fig. 4.88 Seturi de epruvete supuse la încercarea de încovoiere în 3 puncte	123
Fig. 4.89 Histogramele tensiunilor maxime la încovoiere pentru materialele PLA, PLA-TT și ABS	123
Fig. 4.90 Efectul factorilor semnificativi asupra tensiunilor la încovoiere	125
Fig. 4.91 Diagramele Pareto cu influența efectelor factorilor semnificativi asupra tensiunilor la încovoiere	126
Fig. 4.92 Diagramele de contur cu influența efectelor factorilor semnificativi asupra tensiunilor la încovoiere	126
Fig. 4.93 Epruvete încercate la oboseală rotativă	128
Fig. 4.94 Diagrama Wohler pentru materialele PLA și ABS	128

Capitolul 5

Fig. 5.1 Standarde specifice proiectării roților dințate din materiale plastice	142
Fig. 5.2 Recomandări referitoare la proiectarea roților dințate din materiale plastice	142
Fig. 5.3 Modelul geometric al roților dințate în angrenare	145
Fig. 5.4 Discretizarea suprafețelor de contact	146
Fig. 5.5 Analiza de sensibilitate pentru materialul PLA	146
Fig. 5.6 Criteriile privind validarea calității modelului din punct de vedere al discretizării	147
Fig. 5.7 Angrenarea roților dințate	148
Fig. 5.8 Modelarea prin aplicarea vitezei de rotație roții conducătoare	148
Fig. 5.9 Zone de tip sliding, sticking și near.....	149
Fig. 5.10 Comparatie între valorile tensiunilor echivalente determinate numeric și R_m	151
Fig. 5.11 Variația tensiunilor echivalente după criteriul von Mises pentru materialul PLA.....	151
Fig. 5.12 Variația tensiunilor echivalente după criteriul von Mises pentru materialul ABS	151
Fig. 5.13 Variația tensiunilor echivalente după criteriul von Mises pentru materialul PLA-TT.....	152
Fig. 5.14 Variația tensiunilor echivalente după criteriul von Mises pentru materialele ABS, PLA și PLA-TT	152
Fig. 5.15 Distribuția tensiunilor echivalente din zonele solicitate	153
Fig. 5.16 Comparatie între valorile tensiunilor de contact obținute cu MEF și tensiunile de compresiune.....	155
Fig. 5.17 Metodologia de lucru pentru încercările de rupere a dinților roților dințate	156
Fig. 5.18 Dispozitiv pentru încercarea la rupere a dinților roților dințate cu dinți drepți, adaptare după [257].....	158
Fig. 5.19 Încercarea de rupere a dinților roților dințate cu dinți drepți.....	159
Fig. 5.20 Schema solicitărilor dispozitivului de încercare la rupere a dinților roților dințate	160
Fig. 5.21 Histogramele valorilor forțelor (F_d) la care se produce ruperea dinților epruvetelor tip roată dințată.....	161
Fig. 5.22 Analiza variației valorilor forței F_d – Minitab [216].....	162

Capitolul 6

Fig. 6.1 Epruvete tip roată dințată	169
Fig. 6.2 Modalitatea de printare și modelul interior de umplere al roților [258].....	170
Fig. 6.3 Pregătirea și tratarea termică a roților din PLA.....	170
Fig. 6.4 Schema monobloc a standului de încercare în circuit mecanic închis.....	171
Fig. 6.5 Instalație de încercare cu circuit închis.....	173
Fig. 6.6 Montarea roților dințate în instalația de încercare.....	173
Fig. 6.7 Balanță analitică [277]	173
Fig. 6.8 Curba de uzură [278]	173
Fig. 6.9 Curbele de uzură pentru roțile dințate din materialul PLA-TT, în condițiile de încercare $M_{ta} = 1,05 \text{ Nm}$; $G_s = 0,10 \text{ mm}$; $P_u = 50 \%$	177
Fig. 6.10 Epruvete tip roată dințată încercate pe stand	178
Fig. 6.11 Graficul de tip suprafață al uzurii gravimetrice pentru roțile dințate din material PLA	181
Fig. 6.12 Graficul de tip suprafață al uzurii gravimetrice pentru roțile dințate din material PLA-TT	181
Fig. 6.13 Graficul de tip suprafață al uzurii gravimetrice pentru roțile dințate din material ABS	182

Listă de tabele

Capitolul 1

Tabelul 1.1 Alocarea factorilor de succes către domeniile industriale [11].....	17
Tabelul 1.2 Comparatie între fabricația clasică și cea aditivă de tip FDM	19
Tabelul 1.3 Sinteză privind aplicațiile fabricației aditive în diverse domenii	20
Tabelul 1.4 Prezentarea generală a principalelor tehnologii de imprimare 3D [55–61].....	22

Capitolul 3

Tabelul 3.1 Materiale utilizate în tehnologiile aditive	34
Tabelul 3.2 Caracteristicile mecanice ale materialelor utilizate în tehnologia aditivă [61]	34
Tabelul 3.3 Materiale utilizate în diverse tehnologii aditive	35
Tabelul 3.4 Parametrii de imprimare ce influențează caracteristicile fizico-mecanice ale pieselor imprimate 3D	40
Tabelul 3.5 Criteriile de precizie ale roților dințate [133]	43
Tabelul 3.6 Caracteristicile fizico-mecanice și parametrii de printare ale materialelor termoplastice	44
Tabelul 3.7 Caracteristicile tehnice ale imprimantei Raise 3D [138].....	45
Tabelul 3.8 Parametrii geometrici ai roții dințate studiate [140]	48
Tabelul 3.9 Parametrii de imprimare utilizați pentru obținerea roților dințate studiate	49

Capitolul 4

Tabelul 4.1 Parametrii de utilizare ai materialului PLA, respectiv ABS [136].....	53
Tabelul 4.2 Proprietăți fizico-mecanice ale materialului PLA, respectiv ABS [136].....	53
Tabelul 4.3 Planul cercetărilor experimentale	54
Tabelul 4.4 Valorile parametrilor de lucru ai procesului de printare a epruvetelor de încercare	56
Tabelul 4.5 Condițiile de încercare și tipurile epruvetelor	58
Tabelul 4.6 Caracteristicile de imprimare ale epruvetei de compresiune.....	63
Tabelul 4.7 Parametrii de imprimare pentru epruveta de compresiune	63
Tabelul 4.8 Parametrii de profil determinați experimental pentru materialul PLA	73
Tabelul 4.9 Parametrii de proces și nivelurile utilizate în analiza DOE.....	80
Tabelul 4.10 Valorile parametrilor de profil ale suprafeței, coeficientul de frecare și uzura liniară cumulată pentru epruvetele ABS.....	81
Tabelul 4.11 Valorile parametrilor de profil ale suprafeței, coeficientul de frecare și uzura liniară cumulată pentru epruvetele PLA	81
Tabelul 4.12 Valorile parametrilor de profil ale suprafeței, coeficientul de frecare și uzura liniară cumulată pentru epruvetele PLA-TT	81
Tabelul 4.13 Structura simulărilor pentru analiza și modelarea mărimilor cercetate.....	84
Tabelul 4.14 Rezultatele analizei relaționale Grey	88
Tabelul 4.15 Analiza și modelarea mărimilor cercetate	104
Tabelul 4.16 Valorile medii ale numărului de cicluri	128

Capitolul 5

Tabelul 5.1 Elemente de calcul ale roților dințate.....	143
Tabelul 5.2 Caracteristicile de material și valorile calculate ale tensiunilor σ_H	144
Tabelul 5.3 Determinarea tensiunilor echivalente maxime pe suprafețele de contact (criteriul von Mises)	150
Tabelul 5.4 Distribuția valorilor tensiunilor de contact determinate cu MEF.....	154
Tabelul 5.5 Diverse forme de rupere a dinților.....	160
Tabelul 5.6 Valorile forțelor la care se produce ruperea dintelui epruvetei de încercare, F_d și cele înregistrate la mașina de tracțiune, F_m	161

Capitolul 6

Tabelul 6.1 Programul încercărilor experimentale pentru determinarea uzurii roților dințate	175
Tabelul 6.2 Condițiile de încercare.....	175
Tabelul 6.3 Starea suprafețelor obținute la încercarea la uzură a roților dințate din materialul PLA-TT.....	178
Tabelul 6.4 Ecuațiile de uzură și durată maximă de încercare pentru roțile din materialul PLA, PLA-TT și ABS	180
Tabelul 6.5 Graficele de tip suprafață ale uzurii roților dințate din materialele PLA, PLA-TT și ABS.....	181

ANEXE

- Anexa 1. Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul PLA
- Anexa 2. Parametrii microgeometrici pentru materialul PLA
- Anexa 3. Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul PLA-TT
- Anexa 4. Parametrii microgeometrici pentru materialul PLA-TT
- Anexa 5. Profilogramele și diagramele de ondulație pentru materialul ABS
- Anexa 6. Parametrii microgeometrici pentru materialul ABS
- Anexa 7. Valorile rezistenței de rupere la tracțiune pentru PLA, ABS și PLA-TT
- Anexa 8. Curbele de material determinate prin încercarea la tracțiune
- Anexa 9. Valorile tensiunilor de compresiune pentru PLA, ABS și PLA-TT
- Anexa 10. Diagramele tensiune-deformație pentru epruvetele testate la compresiune
- Anexa 11. Valorile medii ale energiei de impact absorbită
- Anexa 12. Valorile medii ale tensiunilor de încovoiere
- Anexa 13. Valorile medii ale uzurii gravimetrice ale roților dințate
- Anexa 14. Curba uzurii pentru materialul PLA
- Anexa 15. Curba uzurii pentru materialul PLA-TT
- Anexa 16. Curba uzurii pentru materialul ABS

Importanța și actualitatea temei

Odată cu creșterea complexității produselor industriale, a cerințelor legate de protecția mediului înconjurător și a conservării resurselor, sunt necesare noi tehnologii de fabricație.

Imprimarea 3D sau fabricația aditivă (AM) este un proces de fabricare a pieselor adăugând materialul strat după strat. Piese fizice sunt printate folosind datele unui model digital, un model 3D sau alte surse cum ar fi un fișier AMF (Additive Manufacturing File).

În acest context, imprimarea 3D reprezintă o tehnologie relativ nouă de fabricație a pieselor, de regulă, cu configurație complexă. Tehnologia de lucru constă dintr-un proces de formare a unui corp solid tridimensional, realizat prin cicluri repetitive de adăugare a unor straturi succesive de material, în diferite forme.

Această tehnică de fabricare a pieselor, adăugând materialul strat după strat, se realizează prin intermediul unui sistem robotizat de fabricație aditivă - imprimanta 3D. Materialele care sunt depuse cu ajutorul imprimantei 3D sunt materiale plastice, materiale metalice, ceramice, biomateriale, rășini, pulberi etc.

Pe lângă avantajele pe care le are, există anumite limitări asociate cu imprimarea 3D, care includ calitatea slabă a suprafeței, precizia dimensională și rezistența mecanică scăzute datorate proprietăților mecanice ale materialelor și porozității ridicate care caracterizează piesele imprimate 3D.

În literatura de specialitate, caracteristicile fizico-mecanice ale pieselor realizate cu ajutorul tehnologiilor aditive, sunt analizate în vederea optimizării proceselor și materialelor folosite, avantajul principal fiind ușurința utilizării acestui proces tehnologic și posibilitatea realizării formelor geometrice complexe, obținerii rapide a prototipurilor și adaptarea designului lor.

În acest context, teza de doctorat cu titlul “*Studii și cercetări privind calitatea componentelor realizate prin tehnologii aditive utilizate la fabricarea angrenajelor*”, abordează aspectele unui domeniu semnificativ și inovativ, cel al fabricației aditive și are ca *obiectiv principal* stabilirea criteriilor de admisibilitate privind evaluarea calității pieselor realizate prin tehnologii aditive utilizate la fabricarea angrenajelor. Astfel, s-au efectuat studii și cercetări experimentale privind: a) posibilitatea înlocuirii roților dințate din componența angrenajelor, fabricate prin tehnologii clasice cu roți dințate fabricate prin tehnologii aditive de tipul extrudarea materialelor termoplastice; b) îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale materialelor termoplastice, în vederea obținerii performanțelor tehnice impuse de condițiile de exploatare.

1. Obiectivele propuse

Obiectivul principal al tezei de doctorat a fost reprezentat de stabilirea criteriilor de admisibilitate privind evaluarea calității componentelor realizate prin tehnologii aditive utilizate la fabricarea angrenajelor. Acest obiectiv principal considerăm că a fost îndeplinit prin programul cercetărilor experimentale efectuate în cadrul tezei de doctorat.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal, al tezei de doctorat au fost abordate următoarele *obiective secundare*:

- Analiza sistemică și sinteza informațiilor prezentate în literatura de specialitate, referitoare la aplicarea tehnologiilor aditive, respectiv stabilirea tipurilor de materiale utilizate pentru aceste tehnologii.

- Analiza sistemică și sinteza informațiilor prezentate în literatura de specialitate, referitoare la aplicarea tehnologiilor aditive, respectiv stabilirea tipurilor de materiale utilizate pentru aceste tehnologii.
- Cercetări teoretice privind caracterizarea procesului de extrudare a materialelor termoplastice cu identificarea parametrilor critici care influențează comportarea mecanică, în exploatare a pieselor.
- Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice și tribologice ale materialelor termoplastice utilizate pentru încercările experimentale (PLA, ABS și PLA-TT)
- Cercetări teoretice și experimentale privind determinarea stărilor de tensiuni și deformății ale roților dințate fabricate prin metoda FDM, prin metode experimentale și numerice.
- Cercetări experimentale privind comportarea în exploatare a roților dințate fabricate prin metoda FDM și analiza statistică a datelor obținute.

2. Rezumatul tezei

Teza de doctorat cu titlul “*Studii și cercetări privind calitatea componentelor realizate prin tehnologii aditive utilizate la fabricarea angrenajelor*” a fost structurată în șapte capitole cuprinzând bibliografie, lista de publicații, anexe și lista de figuri și tabele.

În primul capitol al tezei de doctorat intitulat *Stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive* sunt prezentate noțiunile, elementele de bază privind fabricația aditivă și principiile de bază ale procesului tehnologic. A fost realizată o evaluare a tendințelor actuale și viitoare în domeniul fabricației aditive.

S-a efectuat analiza comparativă între tehnologiile tradiționale de fabricație și cele aditive. Alegerea între aceste două tehnologii de fabricație este impusă de o serie de parametri specifici, privind cerințele de producție, caracteristicile design-ului și proprietățile materialelor folosite.

Tehnologiile de fabricație aditive reprezintă o alternativă la metodele tradiționale de fabricație, utilizând o abordare continuă și integrată în locul proceselor convenționale (turnarea, frezarea sau alte metode de prelucrare mecanică). Pentru fabricația aditivă, materialul utilizat (material plastic, metal, rășină etc.) constituie un element esențial în procesul de fabricație.

Astfel, studiul bibliografic elaborat a permis identificarea principalelor avantaje ale utilizării tehnologiilor aditive comparativ cu metodele tradiționale de fabricație, precum și direcțiile de cercetare pentru îmbunătățirea continuă a acestei tehnologii.

Au fost expuse conceptele fundamentale legate de implementarea proceselor de fabricație aditivă, precum și etapele esențiale implicate în realizarea unui produs prin imprimare 3D, începând de la conceperea modelului tridimensional prin utilizarea software specializat, până la finalizarea procesului de execuție a piesei respective. Această abordare detaliată permite studiul și cercetarea aprofundată a fluxului de lucru tehnic și a parametrilor necesari pentru optimizarea calității și eficienței în fabricația aditivă.

S-a efectuat analiza evoluției tehnologiilor de fabricație aditivă, abordând o perspectivă cronologică. Studiul a identificat și examinat factori determinanți care au influențat progresul și diseminarea tehnologiilor aditive de-a lungul timpului. Printre acești factori se numără evoluția tehnologică în domeniul informaticii și al laserelor, emergența și rafinarea tehnologiilor de control

logic programabil (PLC), precum și dezvoltările semnificative în domeniul software-urilor de proiectare asistată de calculator (CAD).

S-a procedat la identificarea și analiza domeniilor în care fabricația aditivă și-a demonstrat aplicabilitatea și utilitatea. Pentru integrarea cu succes a tehnologiilor aditive pe piață, este esențială evaluarea unor factori determinanți. O analiză a acestor factori, adaptată la diverse sectoare industriale, a fost prezentată în tabelul 1.1. Această abordare sistematică permite stabilirea parametrilor critici ce influențează adoptarea și implementarea tehnologiilor de imprimare 3D în diferite domenii industriale.

S-au detaliat (tabelul 1.4) principiile operaționale ale diverselor tehnologii, printre care se enumeră: stereolitografia, extrudarea de materiale termoplastice, laminarea straturilor, sinterizarea cu laser, topirea cu laser, solidificarea prin expunere la UV, pulverizarea de fotopolimeri și injectarea liantului. Analiza comparativă include, de asemenea, detalii privind volumul de producție, beneficiile și limitările, precizia procesului, costurile asociate, precum și enumerarea companiilor din industrie care dezvoltă aceste tehnologii.

Diseminarea rezultatelor obținute, în acest capitol, ca urmare a cercetărilor efectuate, s-a realizat prin publicarea unui articol științific de tip recenzie [8].

În capitolul al doilea denumit *Obiectivele tezei de doctorat* se prezintă direcțiile care au stat la baza planului cercetărilor experimentale efectuate în scopul realizării obiectivului principal al tezei. Obiectivul principal al tezei de doctorat a fost reprezentat de stabilirea criteriilor de admisibilitate privind evaluarea calității componentelor realizate prin tehnologii aditive utilizate la fabricarea angrenajelor. Acest obiectiv principal considerăm că a fost îndeplinit prin programul cercetărilor experimentale efectuate în cadrul tezei de doctorat.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal, al tezei de doctorat au fost abordate următoarele *obiective secundare*:

- Analiza sistemică și sinteza informațiilor prezentate în literatura de specialitate, referitoare la aplicarea tehnologiilor aditive, respectiv stabilirea tipurilor de materiale utilizate pentru aceste tehnologii.

- S-a efectuat analiza comparativă între tehnologiile tradiționale de fabricație și cele aditive. Alegerea între aceste două tipuri de tehnologii de fabricație este impusă de o serie de parametri specifici, privind cerințele de producție, caracteristicile design-ului și proprietățile materialelor folosite.

- S-a realizat o clasificare generală, a categoriilor de materiale corelate cu tipurile tehnologiilor aditive pe baza datelor analizate și sistematizate din literatura de specialitate, în urma unui studiu bibliografic care a cuprins peste 100 de lucrări științifice (tabelul 3.3).

- Cercetări teoretice privind caracterizarea procesului de extrudare a materialelor termoplastice cu identificarea parametrilor critici care influențează comportarea mecanică, în exploatare a pieselor.

- S-a efectuat analiza caracteristicilor principale ale procesului fabricației aditive FDM, precum și sinteza materialelor compatibile cu această tehnologie, stabilirea parametrilor de lucru ai procedeului de modelare prin depunere fuzionată și determinarea condițiilor de fabricație prin tehnologii aditive pentru o piesă de tip roată dințată.

- S-a efectuat identificarea și evaluarea sistematică a variabilelor de proces, având drept scop stabilirea influenței acestora asupra proprietăților fizice și mecanice ale pieselor fabricate.

- Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice și tribologice ale materialelor termoplastice utilizate pentru încercările experimentale (PLA, ABS și PLA-TT)

➤ S-au efectuat încercări la tracțiune, compresiune, duritate, încovoiere, încovoiere prin șoc, oboseală și analiza micro-geometriei suprafeței pieselor fabricate din trei tipuri de materiale specifice procesului FDM.

➤ S-au analizat și stabilit valorile parametrilor de lucru ai procesului de imprimare a epruvetelor de încercare (viteza de printare, direcția de depunere, procentul de umplere, grosimea stratului depus).

➤ S-a realizat modelarea și printarea tipurilor de epruvete de încercare (pentru încercarea la tracțiune, încercarea la compresiune, determinarea durității, încercarea la încovoiere, încercarea la încovoiere prin șoc, încercarea la oboseală).

➤ S-a efectuat cercetarea microgeometriei materialului depus, determinarea durității materialului, determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la tracțiune, la încercarea la încovoiere, la încercarea la încovoiere prin șoc și la încercarea la oboseală.

• Cercetări teoretice și experimentale privind determinarea stărilor de tensiuni ale roților dințate fabricate prin metoda FDM, prin metode experimentale și numerice.

➤ S-au proiectat și realizat roțile dințate necesare pentru cercetările experimentale, prin metoda tehnologiilor aditive, fabricate din materialele termoplastice: PLA, ABS și PLA-TT.

➤ S-a efectuat analiza cu MEF a angrenajului studiat, ținând seama de următoarele etape: a) modelarea geometrică; b) stabilirea proprietăților de material și a caracteristicilor geometrice; c) discretizarea modelului cu tipul de elemente finite adecvate; d) impunerea condițiilor la limită și a solicitărilor; e) analiza și postprocesarea rezultatelor; f) interpretarea rezultatelor.

➤ S-a efectuat analiza statică a angrenajului studiat, furnizând informații despre distribuția tensiunilor și deformațiilor în condiții de echilibru static.

➤ S-a efectuat analiza în domeniul tranzitoriu prin care se explorează răspunsul dinamic al roților dințate sub influența unor solicitări variabile în timp, acestea fiind esențiale în evaluarea impactului solicitărilor dinamice.

• Cercetări experimentale privind comportarea în exploatare a roților dințate fabricate prin metoda FDM și analiza statistică a datelor obținute.

➤ S-au efectuat încercările experimentale pe epruvete tip roată dințată cu dinți drepți, imprimate 3D din materialele studiate (PLA, PLA-TT și ABS), având drept criteriu de evaluare sarcina de încărcare maximă care provoacă ruperea unui dinte. Determinările experimentale s-au realizat cu ajutorul unui dispozitiv de testare la rupere a roților dințate circulare cu dinți drepți, proiectat și realizat în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești.

➤ S-au efectuat încercările experimentale pe epruvete tip roată dințată cu dinți drepți având drept criteriu de evaluare uzura dinților. Instalația de încercare proiectată și realizată în acest scop, permite cercetarea condițiilor de funcționare ale roților dințate printate din materiale termoplastice. Instalația de încercare face obiectul cererii de brevet de invenție cu nr. A/00877/2023. Cercetările experimentale au fost efectuate în Departamentul de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești utilizând aparate și dispozitive de încercare standardizate și specifice.

În cel de-al treilea capitol, intitulat *Caracterizarea procesului de fabricare prin metoda FDM* s-a efectuat analiza caracteristicilor principale ale procesului fabricației aditive FDM, precum și sinteza materialelor compatibile cu această tehnologie, stabilirea parametrilor de lucru ai procedurii de extrudare a materialelor termoplastice și determinarea condițiilor de fabricație prin tehnologii aditive pentru o piesă de tip roată dințată.

Au fost prezentate și analizate, principalele categorii de materiale utilizate în fabricația aditivă cum ar fi: materiale termoplastice, materiale metalice, materiale ceramice, materiale compozite, biomateriale etc. (conform tabelului 3.1).

Clasificarea materialelor în funcție de tehnologia aditivă utilizată, se poate efectua după mai multe criterii, deoarece există o varietate a tehnologiilor aditive disponibile, iar fiecare dintre acestea prezintă caracteristici distincte și materiale adecvate. Conform datelor analizate și sistematizate din literatura de specialitate, în urma unui studiu bibliografic care a cuprins peste 100 de lucrări științifice, în tabelul 3.3 se prezintă clasificarea generală, a categoriilor de materiale corelate cu tipurile tehnologiilor aditive.

În contextul procesului de extrudare a materialelor termoplastice aplicat în cadrul fabricației aditive, s-a efectuat identificarea și evaluarea sistematică a variabilelor de proces, având drept scop stabilirea influenței acestora asupra proprietăților fizico-mecanice ale pieselor fabricate.

S-au analizat principalii parametri de proces și influența lor asupra extrudării materialelor termoplastice. În general, optimizarea parametrilor de imprimare este esențială pentru a obține rezultate de calitate în procesul de extrudare a materialelor termoplastice. Ajustarea corespunzătoare a acestora poate îmbunătăți aderența stratului, rezistența și precizia imprimării.

Parametrii de imprimare studiați în literatura de specialitate, care s-au dovedit a avea influență asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale pieselor printate prin extrudarea materialelor termoplastice sunt prezentați în tabelul 3.4. Astfel, s-au adoptat ca parametri de proces, studiați în cadrul tezei, doi factori determinanți: grosimea stratului de material depus (G_s) și procentul de umplere (P_u).

Având în vedere studiile și cercetările experimentale care se efectuează în cadrul tezei de doctorat s-a ales ca aplicație tehnologia de fabricare a unei piese tipice din construcția de mașini reprezentate prin roată dințată cilindrică cu dinți drepți, cu profil în evolveră.

Modelul CAD al roții dințate studiate a fost realizat în programul de proiectare Solid Edge, iar parametrii geometrici specifici roților cilindrice cu dinți drepți cu profil în evolveră sunt prezentați în tabelul 3.8.

Pentru realizarea roților dințate și a epruvetelor de încercare din cadrul tezei de doctorat s-a utilizat imprimanta Raise Touch 3D (fig. 3.5). Aceasta este echipată cu două extrudere independente și poate efectua imprimarea simultan în modul oglindă (imprimare sincronizată). Nivelarea automată a patului de imprimare conferă siguranța aderenței primului strat al pieselor la baza de imprimare. Sonda mecanică de înaltă precizie detectează automat planeitatea patului de lucru. Calibrarea automată pe axele X, Y și Z permite îmbunătățirea preciziei și oferă posibilitatea reducerii timpului de execuție.

În tabelul 3.6 se prezintă sinteza caracteristicilor fizico-mecanice ale materiilor prime utilizate în cercetări experimentale desfășurate în cadrul tezei de doctorat. Testele efectuate de producători [136,137], pe epruvete printate sunt orientative și depind de regimurile de printare și de performanțele imprimantelor utilizate.

Pentru studiile și cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat (cap. 4, 5 și 6) s-au utilizat două categorii de materiale termoplastice și anume: PLA, ABS. PLA (acidul polilactic) și ABS (acrilonitril butadienă stiren) sunt polimerii cei mai utilizați în aplicațiile industriale. Pentru polimerul PLA a fost aplicat un tratament termic care a constat în încălzirea până la temperatura de 75 °C, menținerea la temperatură o perioadă de 3 ore, iar apoi răcirea lentă în cuptor. În acest mod, s-a constituit cea de a 3-a categorie de material studiat, iar în continuare este notat PLA-TT.

Diseminarea rezultatelor obținute, în acest capitol, ca urmare a cercetărilor efectuate, s-a realizat prin publicarea unui articol științific de tip recenzie [65].

În capitolul al patrulea denumit *Cercetări teoretice și experimentale privind caracteristicile procesul de printare 3D în scopul realizării epruvetelor de încercare* se prezintă principalele tipuri de materiale termoplastice utilizate în procesul de extrudare folosind tehnologia FDM, caracterizarea și analiza materialelor pe baza datelor furnizate de producător, stabilirea

parametrilor de lucru ai procesului de imprimare a epruvetelor de încercare (viteza de printare, direcția de depunere, procentul de umplere, grosimea stratului depus), modelarea și printarea tipurilor de epruvete de încercare (pentru încercarea la tracțiune, încercarea la compresiune, determinarea durității, încercarea la încovoiere, încercarea la încovoiere prin șoc, încercarea la oboseală), cercetarea microgeometriei materialului depus, determinarea durității materialului, determinarea caracteristicilor mecanice la încercarea la tracțiune, la încercarea la încovoiere, la încercarea la încovoiere prin șoc și la oboseală rotativă.

Cercetările care s-au efectuat, au avut ca obiectiv, determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor termoplastice utilizate la fabricarea produselor prin tehnologii aditive. În acest scop s-au efectuat cercetările experimentale (tab. 4.3) ținând seama de obiectivele specifice ale tezei de doctorat, astfel:

- cercetări experimentale privind modelarea și printarea tipurilor epruvetelor de încercare;
- cercetări experimentale privind stabilirea parametrilor de lucru ai procesului de printare al epruvetelor de încercare;
- cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor de încercare printate 3D;
- cercetări experimentale privind determinarea microgeometriei materialului depus prin tehnologia aditivă;

Procesul de extrudare a diferitelor produse folosind tehnologia FDM este controlat de mai mulți parametri de imprimare care stabilesc modul de construire al modelului de umplere, gradul de umplere, grosimea stratului, temperatura și alți parametri legați de proces.

În acest context, stabilirea planului experimental al cercetărilor (tab. 4.4) s-a realizat prin utilizarea parametrilor de proces variabili: grosimea stratului de material depus $G_s = (0,10; 0,20; 0,20)$ mm și procentul de umplere $P_u = (50; 75; 100)$ %, păstrând toate celelalte reglaje ale procesului constante.

Pentru fiecare tip de material studiat (PLA, PLA-TT și ABS) au fost trasate dependențele $CM = f(PTI)$ corespunzătoare caracteristicilor mecanice (CM) obținute în urma încercărilor specifice a epruvetelor în funcție de parametrii procesului tehnologic de imprimare ($PTI = G_s, P_u$). În acest context, s-au stabilit tipurile încercărilor mecanice care se vor efectua și categoriile epruvetelor utilizate pentru cercetările experimentale, conform tabelului 4.5.

Metodologia determinărilor experimentale cuprinde următoarele etapele de lucru: a) proiectarea epruvetelor de încercare; b) configurarea parametrilor de imprimare; c) imprimarea epruvetelor; d) testarea epruvetelor; e) analiza și interpretarea rezultatelor; f) analiza și modelarea efectelor factorilor semnificativi (G_s, P_u) asupra caracteristicilor mecanice obținute prin determinările experimentale pe baza diagramelor de contur și Pareto.

Încercările experimentale au fost efectuate în condițiile utilizării parametrilor de proces $G_s = (0,10; 0,20; 0,20)$ mm, respectiv $P_u = (50; 75; 100)$ % folosiți la fabricarea epruvetelor din materiale termoplastice (PLA, ABS și PLA-TT).

Referitor la cercetarea microgeometriei stratului depus, studiile și cercetările experimentale efectuate arată existența unor corelații diverse între parametrii de proces studiați (grosimea stratului de material depus G_s și procentul de umplere P_u) și mărimile de ieșire cercetate (parametrii de rugozitate, coeficientul de frecare, uzura liniară cumulată). În acest context, se impune analiza statistică în vederea optimizării parametrilor de proces pentru stabilirea comportamentului tribologic al pieselor imprimate 3D, analiză efectuată în paragraful 4.4.1.4.

Parametrii de rugozitate măsurați, cuantificați prin indicatorii (R_a, R_z și R_t), au indicat valori diferite în funcție de parametrii de proces utilizați. Astfel, valoarea cea mai mică a parametrului de rugozitate ($R_{a,min,ABS} = 6,18 \mu m$) s-a obținut pentru cazul epruvetei ABS, în condițiile în care

parametrii de proces au avut valorile: grosimea stratului depus $G_s = 0,10$ mm și procentul de umplere $P_u = 100$ %, iar valoarea cea mai mare ($R_{a,max,ABS} = 17,6$ μm) s-a obținut pentru cazul epruvetei ABS, în condițiile în care parametrii de proces au avut valorile: grosimea stratului depus $G_s = 0,20$ mm și procentul de umplere $P_u = 75$ %.

Sintetizând datele referitoare la coeficientul de frecare, obținute prin determinările experimentale, pentru cercetările efectuate pe cele trei categorii de materiale (PLA, PLA-TT și ABS), s-a constatat că valoarea cea mai mare a coeficientului de frecare ($\mu_{max,PLA,TT} = 0,38$) s-a obținut pentru grosimea stratului de material depus $G_s = 0,10$ mm și procentul de umplere $P_u = 100$ %, iar valoarea cea mai mică ($\mu_{min,ABS} = 0,05$) s-au obținut pentru $G_s = 0,10$ mm și $P_u = 50$ %.

Referitor la cercetarea durității stratului depus, conform metodologiei prezentate în paragraful 4.3.3 încercările de duritate au fost efectuate pe un număr de 135 epruvete. Încercarea s-a realizat pentru epruvete printate din trei tipuri de materiale (PLA, PLA-TT și ABS) având drept parametrii de proces (grosimea stratului de material depus $G_s = (0,1; 0,15; 0,20$ mm) și procentul de umplere $P_u = (50; 75; 100$ %).

Conform datelor obținute prin cercetările experimentale proprii, valorile cele mai mari ale durităților ($D_{PLA} = 88,28$ Shore D) au fost obținute pentru cazul materialului PLA, valori confirmate parțial și de sursele bibliografice analizate [190, 225, 231, 232]. De asemenea, valorile cele mai mici ale durităților ($D_{ABS} = 56,33$ Shore D) au fost obținute pentru cazul materialului ABS, în condițiile utilizării parametrilor de proces $G_s = 0,15$ mm și $P_u = 50$ %.

Referitor la încercările la tracțiune, studiile și cercetările s-au efectuat conform standardelor ASTM Standard test method for tensile properties of plastics [1], D638, 2010 Plastics - Determination of tensile properties - ISO 527-1, 2019 [2]. Forma și dimensiunile principale ale epruvetei sunt prezentate în figura 4.3.

S-au realizat eșantioane de testare, grupate pe seturi de epruvete, fiecare set a fost format din 5 bucăți, aparținând unui grup de parametri de proces (G_s , P_u – conform tab. 4.4). În total, un număr de 135 de epruvete au fost fabricate prin imprimare 3D. Epruvetele au fost printate din materiale termoplastice (PLA, ABS, PLA-TT (tab. 3.5, tab. 4.4).

Epruvetele au fost supuse încercării de tracțiune pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor studiate (PLA, PLA-TT și ABS) și anume: rezistența de rupere la tracțiune (R_m), alungirea la rupere (ϵ), modul de elasticitate longitudinal (E) și coeficientul lui Poisson (ν), în funcție de parametrii procesului tehnologic de imprimare (G_s , P_u). Încercările s-au efectuat pe mașina de încercare la tracțiune cu celulă de forță de 2,5 kN, la o viteză de 5 mm/min (fig. 4.5).

Pentru determinarea coeficientului Poisson (ν) s-a utilizat metoda tensometriei electrice rezistive. În acest context, s-au folosit epruvete de tracțiune, pe care au fost aplicate traductoare rezistive de tip marcă tensometrică (fig. 4.6). S-au montat câte 2 mărci tensometrice uniaxiale, pe fiecare din fețele lungi ale epruvetei de tracțiune, pe direcție axială (longitudinală) și transversală (fig. 4.7 și 4.8). Prin solicitarea unei epruvete la întindere pe lângă deformația specifică longitudinală (ϵ_a), apare și o deformație specifică transversală (ϵ_t). Legătura între cele două deformații specifice se face prin coeficientul de contracție transversală.

Scopul cercetărilor experimentale efectuate este de a stabili corelația dintre caracteristicile mecanice (R_m , ϵ , E) ale materialelor termoplastice (PLA, PLA-TT și ABS) și parametrii de proces utilizați (G_s , P_u) pentru fabricarea epruvetelor prin imprimare 3D.

Din analiza datelor referitoare la valorile medii ale rezistenței de rupere la tracțiune (R_m), ierarhizate în ordine descrescătoare pentru cele 3 tipuri de materiale studiate s-a constatat că: $R_{m,med,PLA-TT} = 37,77$ MPa, $R_{m,med,PLA} = 30,53$ MPa, $R_{m,med,ABS} = 24,45$ MPa. În aceste condiții, scăderile relative procentuale sunt: de la PLA-TT la PLA de 19,1 %; de la PLA-TT la ABS de 35,2 %; de la PLA la ABS de 19,9 %.

Valorile medii ale alungirii la rupere (ϵ) ierarhizate în ordine descrescătoare pentru cele trei tipuri de materiale studiate (PLA, ABS, PLA-TT) sunt: $\epsilon_{med,PLA} = 14,56 \%$, $\epsilon_{med,PLA-TT} = 7,84 \%$, $\epsilon_{med,ABS} = 5,75 \%$. În aceste condiții, scăderile relative procentuale sunt: de la PLA la PLA-TT de 46,1 %; de la PLA la ABS de 60,5 %; de la PLA-TT la ABS de 26,7 %.

Din analiza datelor referitoare la modulul de elasticitate longitudinal (E), s-a constatat că valorile acestei caracteristici (pentru materialele PLA, ABS, PLA-TT) se încadrează în limitele $E_{PLA} = (809,3...2607,3)$ MPa - fig. 4.42, 4.45, 4.48, $E_{ABS} = (953,2...3078,2)$ MPa - fig. 4.51, 4.54, 4.57 și $E_{PLA-TT} = (1568,08...2999,31)$ MPa - fig. 4.61, 4.64, 4.67. Valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinal determinată experimental $E_{max,ABS} = 3078,2$ MPa, s-a obținut în condițiile utilizării parametrilor de proces definiți prin grosimea stratului de material depus $G_s = 0,10$ mm și procentul de umplere $P_u = 100\%$, iar valoarea minimă $E_{min,PLA} = 809,3$ MPa, în condițiile $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$.

Referitor la încercările la compresiune, studiile și cercetările efectuate, au avut drept scop determinarea caracteristicile mecanice ale materialelor termoplastice la solicitarea la compresiune și de a stabili corelația dintre caracteristicile mecanice obținute și parametrii de proces utilizați pentru fabricarea epruvetelor prin imprimare 3D.

Conform metodologiei prezentate în paragraful 4.3.2 încercările la compresiune au fost efectuate pe mașina universală Zwick Roell. Preîncărcarea a fost de 20 N, la o viteză de 10 mm/min, conform ISO 604:2002(E), [3]. Au fost efectuate încercări de compresiune, pe seturi de câte 5 epruvete pentru fiecare dintre parametrii de proces studiați (tab. 4.7). Caracteristicile de imprimare ale epruvetelor sunt prezentate în tabelul 4.6. Încercările s-au efectuat pe epruvete printate din trei tipuri de materiale: PLA, PLA-TT și ABS.

Din analiza rezultatelor cercetărilor experimentale s-a constatat că materialul PLA prezintă valoarea medie cea mai mare a tensiunilor de compresiune ($R_{comp,PLA} = 71,4$ MPa), obținută în condițiile grosimii stratului depus $G_{s,PLA} = 0,10$ mm și un procent de umplere $P_{u,PLA} = 100 \%$, succedat de materialul PLA-TT cu ($R_{comp,PLA-TT} = 71,2$ MPa), valoare medie obținută în condițiile $G_{s,PLA-TT} = 0,15$ mm și $P_{u,PLA-TT} = 100 \%$ și apoi materialul ABS cu ($R_{comp,ABS} = 61,4$ MPa), valoare medie obținută în condițiile $G_{s,ABS} = 0,10$ mm și $P_{u,ABS} = 100 \%$. Conform referinței [4], pentru materialul PLA au fost obținute rezultate similare cu cele înregistrate prin cercetările experimentale proprii.

Referitor la încercările la încovoiere prin șoc, conform determinărilor experimentale efectuate, media valorilor energiei de rupere absorbite (E_T) permite ierarhizarea în mod descrescător a materialelor studiate, astfel: ABS ($E_{T,ABS,med} = 0,270$ J), PLA-TT ($E_{T,PLA-TT,med} = 0,221$ J) și PLA ($E_{T,PLA,med} = 0,078$ J). Se constată o scădere procentuală relativă a energiei de rupere absorbite între PLA-TT și ABS de 22,1%, PLA și ABS de 246%, PLA și PLA-TT de 183 %. Valoarea cea mai mare a energiei de rupere absorbite este $E_{T,ABS,max} = 0,314$ J care s-a obținut pentru materialul ABS în condițiile utilizării factorilor semnificativi $G_s = 0,20$ mm și $P_u = 50\%$, iar valoarea cea mai mică este $E_{T,PLA,min} = 0,072$ J s-a obținut pentru materialul PLA în condițiile utilizării factorilor semnificativi $G_s = 0,10$ mm și $P_u = 50\%$, diferența procentuală fiind de 336%.

Referitor la încercările la încovoiere, scopul cercetărilor experimentale efectuate este de a determina caracteristicile mecanice ale materialelor termoplastice la încercarea la încovoiere și de a stabili corelația dintre caracteristicile mecanice obținute și parametrii de proces utilizați pentru fabricarea epruvetelor prin imprimare 3D.

Conform determinărilor experimentale efectuate, media valorilor tensiunilor maxime la încovoiere (T_{inc}) permite ierarhizarea în mod descrescător a materialelor studiate, astfel: PLA-TT ($T_{inc,PLA-TT,med} = 119$ MPa), PLA ($T_{inc,PLA,med} = 107$ MPa) și ABS ($T_{inc,ABS,med} = 64$ MPa). Se constată

o scădere procentuală a tensiunilor maxime la încovoiere între PLA-TT și ABS de 85,9 %, PLA și ABS de 67,1%, PLA-TT și PLA de 11,2 %.

Din punct de vedere al corelației dintre factorii semnificativi utilizați (G_s , P_u) și valorile tensiunilor maxime la încovoiere se constată că aceștia prezintă influențe diferite. Cu creșterea gradului de umplere $P_u = (50; 75; 100) \%$ valorile tensiunilor maxime la încovoiere (T_{inc}) cresc. Pentru grosimea stratului de material depus valorile cele mai mari ale tensiunilor la încovoiere s-au obținut în condițiile grosimilor de material $G_s = 0,15 \text{ mm}$, $T_{inc,PLA-TT,max} = 127,9 \text{ MPa}$ pentru PLA-TT, $G_s = 0,20 \text{ mm}$, $T_{inc,PLA,med} = 113,5 \text{ MPa}$ pentru PLA, respectiv $G_s = 0,20 \text{ mm}$, $T_{inc,ABS,max} = 78,4 \text{ MPa}$ pentru ABS.

Referitor la încercările la oboseală rotativă, studiile și cercetările s-au efectuat conform metodologiei prezentate în paragraful 4.3.6. Au fost imprimate (fig. 4.18) seturi de câte 5 epruvete, pentru fiecare tip de material care a fost încercat (PLA și ABS). Valorile parametrilor de proces utilizați pentru execuția epruvetelor sunt: grosimea stratului de material depus $G_s = (0,1; 0,15) \text{ mm}$ și procentul de umplere $P_u = 50\%$, conform paragraful 4.4.1.

Cercetările experimentale efectuate în cadrul încercării epruvetelor la oboseală rotativă au constatat în determinarea dependenței dintre amplitudinea maximă a tensiunii aplicate și numărul de cicluri până la ruperea epruvetei. În acest context, au fost trasate curbele la oboseală pentru materialele încercate PLA și ABS (fig. 4.94).

Din analiza valorilor tensiunilor obținute prin determinările experimentale, se constată că materialul ABS prezintă o durabilitate mai bună la solicitări ciclice, comparativ cu PLA, deoarece poate suporta valori ale tensiunilor mai mari pentru un număr similar de cicluri. De asemenea, curba de variație pentru materialul ABS scade mai lent decât pentru PLA, sugerând că ABS prezintă o rezistență mai mare la oboseală pe măsură ce numărul de cicluri crește.

Diseminarea rezultatelor obținute, în acest capitol, ca urmare a cercetărilor efectuate, s-a realizat prin publicarea unui număr de șase articole indexate WOS [155, 157, 158, 235, 236, 239].

În capitolul al cincilea denumit *Cercetări teoretice și experimentale privind determinarea stărilor de tensiuni și deformații ale roților dințate fabricate prin metoda FDM*, se prezintă calculul analitic de rezistență al angrenajului studiat, determinarea stărilor de tensiuni ale roților dințate utilizând metoda elementului finit (MEF) și încercările experimentale de rupere a dinților roților dințate fabricate prin metoda FDM.

În acest context, s-au stabilit datele de proiectare și s-a efectuat calculul de rezistență al roților dințate fabricate din materiale termoplastice. Puterea nominală transmisă (P) și turația de funcționare (n) sunt adoptate corespunzător condițiilor de funcționare ale standului de încercare, proiectat în capitolul 6, având următoarele valori: $P = 80 \text{ W}$, $n = 175 \text{ rot/min}$. S-a realizat calculul de rezistență al roților dințate studiate, ținând seama de presiunea de contact pe flancurile dinților și de ruperea dinților prin oboseală datorită solicitărilor la încovoiere. Elementele de calcul ale roților dințate studiate sunt prezentate în tabelul 5.1.

Analiza cu MEF a angrenajului studiat, s-a efectuat ținând seama de următoarele etape: a) modelarea geometrică; b) stabilirea proprietăților de material și a caracteristicilor geometrice; c) discretizarea modelului cu tipul de elemente finite adecvate; d) impunerea condițiilor la limită și a solicitărilor; e) analiza și postprocesarea rezultatelor; f) interpretarea rezultatelor.

Deoarece roțile dințate sunt supuse la solicitări complexe și variabile, anizotropia generată în timpul extrudării poate influența semnificativ performanța structurală a acestora. MEF oferă o modalitate riguroasă de evaluare numerică a comportamentului roților dințate, luând în considerare anizotropia materialului și modelând interacțiunile complexe între straturile depuse. Această abordare permite o înțelegere detaliată a modului în care variabilele geometrice, condițiile de

încărcare și particularitățile materialelor interacționează pentru a determina performanța finală a roților dințate imprimare 3D.

S-a investigat influența mărimii elementelor finite asupra acurateții rezultatelor în tensiuni, facilitând o abordare echilibrată între precizie și eficiența computațională. Această abordare în interpretarea rezultatelor a oferit o perspectivă detaliată asupra performanței angrenajului.

Sintetizând rezultatele referitoare la valorile tensiunilor de contact, stabilite în regim tranzitoriu pentru angrenajul studiat, în figura 5.16 se prezintă comparația între valorile tensiunilor de contact obținute cu MEF și valorile tensiunilor de compresiune stabilite prin determinări experimentale, conform încercărilor efectuate în capitolul 4.

În continuare, au fost efectuate încercările experimentale de rupere a dinților roților dințate fabricate prin metoda FDM, care au drept scop stabilirea parametrilor limită la care epruveta tip roată dințată își poate îndeplini, în mod corespunzător rolul funcțional.

Determinările experimentale s-au realizat cu ajutorul unui dispozitiv de testare la rupere a roților dințate circulare cu dinți drepiți, proiectat și realizat în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești. Cu ajutorul acestui dispozitiv de încercare, s-au efectuat încercările experimentale pe epruvete tip roată dințată cu dinți drepiți, imprimare 3D din materialele studiate (PLA, PLA-TT și ABS), având drept criteriu de evaluare sarcina de încărcare maximă care provoacă ruperea unui dinte.

Calculând media valorilor forței (F_d) la care se produce ruperea dinților epruvetelor tip roată dințată, se constată că materialul PLA-TT prezintă media forțelor cu valoarea cea mai mare $F_{d,med,PLA-TT} = 1332,8$ N, apoi să situează materialul PLA cu $F_{d,med,PLA} = 1309,1$ N și materialul ABS cu $F_{d,med,ABS} = 607,0$ N. Valoarea medie a forței (F_d) la care se produce ruperea dinților epruvetelor tip roată dințată confecționată din materialul PLA-TT este mai mare de 1,02 ori decât la materialul PLA, respectiv de 2,19 ori în comparație cu materialul ABS. Așadar, din cele trei tipuri de materiale termoplastice studiate PLA, PLA-TT și ABS, materialul PLA-TT prezintă rezistența cea mai ridicată la solicitarea de rupere a dinților, iar materialul ABS valoarea cea mai scăzută.

Utilizând analiza ANOVA unidirecțională (fig. 5.22) se examinează efectul tipului materialului (PLA, PLA-TT și ABS) din care sunt fabricate epruvetele de încercare, asupra forței (F_d) la care se produce ruperea dinților. Ipotezele analizei implică 3 grupuri de valori, reprezentând cele 3 tipuri de materiale studiate, din care s-au fabricat epruvetele de tip roată supuse încercărilor de rupere a dinților.

Pentru materialul ABS, media valorilor forței este $F_{d,mediu,ABS} = 607$ N (fig. 5.22, c) și se distribuie într-un câmp de variație de la 500 N la 750 N, cu o abatere medie pătratică de $Stdev_{ABS} = 153,8$ N.

Pentru materialul PLA, media valorilor forței (F_d) este mai mare, comparativ cu PLA, situată în jurul valorii de $F_{d,mediu,PLA} = 1309$ N, cu câmpul de variație cuprins între (1173...1444) N (fig. 5.21 c), având abaterea medie pătratică de $Stdev_{PLA} = 175,2$ N.

Materialul PLA-TT prezintă media valorilor forței (F_d), cea mai mare $F_{d,mediu,PLA-TT} = 1332$ N, comparativ cu PLA și ABS, dar cu un câmp de variație mai restrâns, ceea ce înseamnă variabilitatea datelor într-un câmp de variație cuprins între (1193...1468) N. Abaterea medie pătratică, în acest caz este $Stdev_{PLA-TT} = 60$ N.

De remarcat este faptul că, pentru materialele PLA și PLA-TT, câmpul de variație este mai restrâns comparativ cu ABS, ceea ce indică omogenitatea structurii materialelor studiate.

În capitolul al șaselea, intitulat *Cercetări experimentale privind determinarea uzurii roților dințate fabricate prin metoda FDM*, se prezintă identificarea modelelor și analiza procesul de uzură ale angrenajelor compuse din roți dințate fabricate din materiale termoplastice și stabilirea

corelațiilor privind influența parametrilor de imprimare a epruvetelor tip roată dințată asupra procesului de uzură.

S-au proiectat și au fost fabricate prin metoda FDM perechi de epruvete tip roată dințată din materiale termoplastice, cu parametrii de imprimare prezentați în tabelul 4.4. Modelul geometric al epruvetelor tip roată dințată este prezentat în figura 6.1.

S-a proiectat instalația de încercare în circuit mecanic închis, a cărei schemă cinematică, de principiu, este prezentată în figura 6.4. Instalația de încercare (fig. 6.5) este utilizată pentru stabilirea uzurii roților dințate, fabricate prin metoda FDM, din materiale termoplastice (PLA, PLA-TT și ABS). Prezentarea instalației (care face obiectul cererii de brevet de invenție cu nr. A/00877/2023), în mod detaliat, este redată în paragraful 6.4.

S-a determinat gravimetric uzura roților dințate încercate, prin cântărirea acestora la anumite intervale de timp precizate, $t_{inc} = (15; 45; 105; 120; 135; 150)$ min. Procesul de cântărire s-a realizat cu ajutorul unei balanțe analitice tip KERN ALJ 310-4A (fig. 6.8), evaluându-se masa roților dințate cu precizia de 10^{-4} grame.

S-au trasat curbele de uzură prezentate în figura 6.10 care arată evoluția după caracteristica obișnuită a uzurii cuplelor de frecare. Imaginile suprafețelor obținute la încercarea la uzură a materialului PLA-TT, prezentate în tabelul 6.3, arată evoluția uzurii, în care se pot identifica cele 3 zone specifice: perioada de rodaj, perioada uzurii normale de funcționare și perioada uzurii limită (sau catastrofală). Conform imaginilor prezentate în tabelul 6.3, în perioada uzurii limită s-au produs exfolieri ale suprafeței cercetate, ceea ce impune condiții de supraveghere suplimentare sau înlocuirea cuple cinematice analizate.

S-a efectuat analiza datelor obținute prin determinările experimentale, prin prelucrarea statistică a informațiilor (tabelul 6.4), în scopul determinării modului de variație a uzurii în funcție de parametrii studiați: tipul materialului (PLA, ABS și PLA-TT), momentul de torsiune aplicat $M_{ta} = (1,05; 1,20; 1,35)$ Nm și parametrii de proces utilizați pentru fabricarea roților dințate (grosimea stratului depus $G_s = (0,1; 0,15)$ mm și procentul de umplere $P_u = 50\%$).

În scopul interpretării corespunzătoare și detaliată a modului în care variază uzura în funcție de parametrii studiați, s-a realizat abordarea care combină analiza grafică de tip suprafață cu modelarea matematică prin ecuații de regresie polinomială. Această analiză a permis, pe de o parte, identificarea modelelor și tendințelor care determină procesul de uzură al roților dințate în angrenare și, pe de altă parte, dezvoltarea strategiilor de optimizare și prevenție care să contribuie la prelungirea duratei de viață și la îmbunătățirea eficienței sistemelor mecanice.

Prin intermediul graficelor de suprafață (tabelul 6.5) se vizualizează corelațiile complexe dintre variabilele care influențează uzura roților dințate, oferind o perspectivă tridimensională asupra comportamentului sistemului. Complementar, ecuațiile de regresie polinomială permit cuantificarea acestor relații, oferind un instrument pentru predicția uzurii în diferite situații de operare.

Diseminarea rezultatelor obținute, în acest capitol, ca urmare a cercetărilor efectuate, s-a realizat prin publicarea unui articol indexat WOS [278].

3. Contribuții personale

Pe baza studiilor și cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat se evidențiază următoarele aspecte care constituie contribuția personală.

A. Studiul bibliografic

- Analiza critică a stadiului actual privind evoluția tehnologiilor de fabricație aditivă, abordând o perspectivă cronologică (fig. 1.1). Studiul a identificat și examinat factori determinanți care au influențat progresul și diseminarea tehnologiilor aditive (tabelul 1.1, 1.2, 1.3).
- Elaborarea unui studiu bibliografic care a cuprins peste 100 de lucrări științifice, în care se prezintă o clasificare generală a categoriilor de materiale corelate cu tipurile tehnologiilor aditive utilizate (tabelul 3.3).
- S-a efectuat sinteza proprietăților mecanice ale materialelor utilizate în tehnologiile aditive (tabelul 3.2).

B. Aplicații. Model de calcul

- Calculul analitic de rezistență al roților dințate studiate, ținând seama de presiunea de contact pe flancurile dinților și de ruperea dinților prin oboseală datorită solicitărilor la încovoiere. Elementele de calcul ale roților dințate studiate sunt prezentate în tabelul 5.1.
- Metodă de modelare a epruvetelor de încercare utilizate în cadrul determinărilor experimentale (epruvete pentru încercarea de tracțiune, compresiune, încovoiere, încovoiere prin șoc, oboseală, epruvete tip roți dințate cu dinți drepți). Modelul epruvetei a fost proiectat folosind software-ul Solid Edge, transformat în format STL, iar G-code-ul a fost realizat folosind software-ul imprimantei 3D: Idea Maker.
- Modelarea statistică de tip DOE (Design of Experiments) în scopul optimizării comportamentului tribologic al suprafețelor epruvetelor imprimate 3D.

C. Cercetări experimentale

- Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice și tribologice ale materialelor termoplastice (PLA, ABS și PLA-TT), utilizate pentru încercările experimentale.
- Cercetări teoretice și experimentale privind determinarea stărilor de tensiuni ale roților dințate fabricate prin metoda FDM, prin metode experimentale și numerice.
- Cercetări experimentale privind comportarea în exploatare a roților dințate fabricate prin metoda FDM și analiza statistică a datelor obținute.

D. Conceperea, proiectarea, modernizarea dispozitivelor de încercare

➤ Proiectarea și construcția instalației de încercare ce permite cercetarea condițiilor de funcționare ale roților dințate printate din materiale termoplastice. Instalația de încercare face obiectul cererii de brevet de invenție cu nr. A/00877/2023. Cercetările experimentale au fost efectuate în Departamentul de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești utilizând aparate și dispozitive de încercare standardizate și specifice.

- Îmbunătățirea construcției dispozitivului de testare la rupere a dinților roților dințate cu dinți drepți, imprimate 3D din materialele (PLA, PLA-TT și ABS), proiectat și realizat în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești.

E. Modelare, simulare

➤ Analiza cu MEF a angrenajului alcătuit din două roți dințate cu dinți drepți având proprietățile de material și caracteristicile geometrice prezentate în tabelul 5.2, respectiv tabelul 3.8. La fabricarea roților dințate au fost utilizate materialele (PLA, ABS și PLA-TT) ale căror proprietăți mecanice (rezistența de rupere la tracțiune, modulul de elasticitate

longitudinal, alungirea la rupere, coeficientul lui Poisson) au fost determinate prin încercări experimentale în capitolul 4.

➤ Modelarea de tip Joint-Rotational Velocity (figura 5.8) prin aplicarea vitezei de rotație roții conducătoare, reprezentând o condiție de încărcare dinamică esențială pentru simularea răspunsului angrenajului într-un interval de timp dat.

F. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele studiilor și cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat au fost diseminate sub formă de 14 articole științifice publicate în reviste indexate (WOS, categoria Q1, Q2) conform Listei de publicații.

4. Direcții viitoare de cercetare

Cercetările efectuate și rezultatele obținute, permit abordarea unor direcții de cercetare noi, care pot fi evidențiate prin:

- cercetări experimentale pentru alte aplicații industriale (lagăre de alunecare, arbori etc.);
- cercetări experimentale privind determinarea influenței altor parametri ai procesului de imprimare (viteza de depunere, temperatura de extrudare, orientarea piesei etc.) asupra caracteristicilor mecanice ale materialelor;
 - studiul influenței tratamentelor termice (post-imprimare) aplicate materialelor termoplastice, scopul îmbunătățirii proprietăților mecanice;
 - studiul interdisciplinar al polimerilor utilizați în tehnologiile aditive aplicând tehnici de analiză termică (DSC și TGA) și caracterizarea structurii materialelor prin tehnica difracției razelor X (XRD).
- cercetări teoretice și experimentale privind sustenabilitate și consumul energetic al tehnologiilor aditive.

5. Bibliografie

1. * * * D20 Committee *Test Method for Tensile Properties of Plastics*; ASTM International;
2. * * * ISO 527-1:2019(En), Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 1: General Principles Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:527:-1:ed-3:v1:en> (accessed on 28 September 2023).
3. * * * ISO 604:2002(E) 2002.
4. Mehdiyev, Z.; Felhő, C.; Zoltán, K. Investigation on 3D Printing Parameters of PLA Polymers for Gear Applications. In: 2022; pp. 654–664 ISBN 978-3-031-15210-8.
5. Shkundalova, O.; Rimkus, A.; Gribniak, V. Structural application of 3d printing technologies: mechanical properties of printed polymeric materials / Konstrukcinis 3d spausdinimo technologijų taikymas: spausdintų polimerinių medžiagų mechaninės savybės. *Science - Future of Lithuania* **2018**, 10, 1–8, doi:10.3846/mla.2018.6250.
6. Somireddy, M.; Czekanski, A. Anisotropic Material Behavior of 3D Printed Composite Structures – Material Extrusion Additive Manufacturing. *Materials & Design* **2020**, 195, 108953, doi:10.1016/j.matdes.2020.108953.

7. Huang, J.; Xia, S.; Li, Z.; Wu, X.; Ren, J. Applications of Four-Dimensional Printing in Emerging Directions: Review and Prospects. *Journal of Materials Science & Technology* **2021**, 91, 105–120, doi:10.1016/j.jmst.2021.02.040.
8. Portoaca, A.I.; Nae, I., Additive manufacture. Applications in the petroleum and petrochemical industry, *Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology*; **2021**, Vol. 3;
9. Liu, Y.; Wang, L.; Vincent Wang, X. Cloud Manufacturing: Latest Advancements and Future Trends. *Procedia Manufacturing* **2018**, 25, 62–73, doi:10.1016/j.promfg.2018.06.058.
10. Groumpos, P.P. A Critical Historical and Scientific Overview of All Industrial Revolutions. *IFAC-PapersOnLine* **2021**, 54, 464–471, doi:10.1016/j.ifacol.2021.10.492.
11. Dombrowski, U.; Wagner, T. Mental Strain as Field of Action in the 4th Industrial Revolution. *Procedia CIRP* **2014**, 17, 100–105, doi:10.1016/j.procir.2014.01.077.
12. Molitch-Hou, M. The First 3D Printed Polymer Implant to Receive FDA Approval Available online: <https://3dprintingindustry.com/news/the-first-3d-printed-polymer-implant-to-receive-fda-approval-5821/> (accessed on 30 August 2023).
13. * * * Exo-Prosthetics: Light, Cheap & Custom 3D-Printed Body Parts - WebUrbanist 2015.
14. Additive Applications | GE Additive Available online: <https://www.ge.com/additive/additive-parts> (accessed on 30 August 2023).
15. Gausemeier, J. *Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries*; HEINZ NIXDORF INSTITUTE: Paderborn, 2011;
16. * * * Universität Paderborn - Direct Manufacturing Research Center (DMRC) – Academic Available online: <https://piaf.uni-paderborn.de/> (accessed on 25 January 2024).
17. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering* **2018**, 143, 172–196, doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
18. Domingo-Espin, M.; Travieso-Rodriguez, J.A.; Jerez-Mesa, R.; Lluma-Fuentes, J. Fatigue Performance of ABS Specimens Obtained by Fused Filament Fabrication. *Materials* **2018**, 11, 2521, doi:10.3390/ma11122521.
19. Brčić, M.; Krščanski, S.; Brnić, J. Rotating Bending Fatigue Analysis of Printed Specimens from Assorted Polymer Materials. *Polymers* **2021**, 13, 1020, doi:10.3390/polym13071020.
20. Wach, R.A.; Wolszczak, P.; Adamus-Włodarczyk, A. Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular Materials and Engineering* **2018**, 303, 1800169, doi:10.1002/mame.201800169.
21. Yadav, P.; Angajala, D.K.; Singhal, I.; Sahai, A.; Sharma, R.S. Evaluating Mechanical Strength of Three Dimensional Printed PLA Parts by Free Form Fabrication. *Materials Today: Proceedings* **2021**, 46, 9498–9502, doi:10.1016/j.matpr.2020.03.557.
22. Zhang, W.; Chabok, A.; Kooi, B.J.; Pei, Y. Additive Manufactured High Entropy Alloys: A Review of the Microstructure and Properties. *Materials & Design* **2022**, 220, 110875, doi:10.1016/j.matdes.2022.110875.
23. Park, J.M.; Kim, E.S.; Kwon, H.; Sathiyamoorthi, P.; Kim, K.T.; Yu, J.-H.; Kim, H.S. Effect of Heat Treatment on Microstructural Heterogeneity and Mechanical Properties of 1%C-CoCrFeMnNi Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing* **2021**, 47, 102283, doi:10.1016/j.addma.2021.102283.
24. Zhang, B.; Wei, W.; Shi, W.; Guo, Y.; Wen, S.; Wu, X.; Gao, K.; Rong, L.; Huang, H.; Nie, Z. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Er-Containing Al-7Si-0.6 Mg Alloy by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, 18, 3073–3084, doi:10.1016/j.jmrt.2022.04.023.

25. Lin, D.; Xu, L.; Jing, H.; Han, Y.; Zhao, L.; Minami, F. Effects of Annealing on the Structure and Mechanical Properties of FeCoCrNi High-Entropy Alloy Fabricated via Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing* **2020**, 32, 101058, doi:10.1016/j.addma.2020.101058.
26. Song, B.; Dong, S.; Liu, Q.; Liao, H.; Coddet, C. Vacuum Heat Treatment of Iron Parts Produced by Selective Laser Melting: Microstructure, Residual Stress and Tensile Behavior. *Materials & Design (1980-2015)* **2014**, 54, 727–733, doi:10.1016/j.matdes.2013.08.085.
27. Cheruvathur, S.; Lass, E.A.; Campbell, C.E. Additive Manufacturing of 17-4 PH Stainless Steel: Post-Processing Heat Treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure. *JOM* **2016**, 68, 930–942, doi:10.1007/s11837-015-1754-4.
28. Wang, C.; Tan, X.P.; Du, Z.; Chandra, S.; Sun, Z.; Lim, C.W.J.; Tor, S.B.; Lim, C.S.; Wong, C.H. Additive Manufacturing of NiTi Shape Memory Alloys Using Pre-Mixed Powders. *Journal of Materials Processing Technology* **2019**, 271, 152–161, doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.03.025.
29. Alagha, A.N.; Hussain, S.; Zaki, W. Additive Manufacturing of Shape Memory Alloys: A Review with Emphasis on Powder Bed Systems. *Materials & Design* **2021**, 204, 109654, doi:10.1016/j.matdes.2021.109654.
30. Bimber, B.A.; Hamilton, R.F.; Keist, J.; Palmer, T.A. Anisotropic Microstructure and Superelasticity of Additive Manufactured NiTi Alloy Bulk Builds Using Laser Directed Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A* **2016**, 674, 125–134, doi:10.1016/j.msea.2016.07.059.
31. Hamilton, R.F.; Bimber, B.A.; Palmer, T.A. Correlating Microstructure and Superelasticity of Directed Energy Deposition Additive Manufactured Ni-Rich NiTi Alloys. *Journal of Alloys and Compounds* **2018**, 739, 712–722, doi:10.1016/j.jallcom.2017.12.270.
32. Marattukalam, J.J.; Balla, V.K.; Das, M.; Bontha, S.; Kalpathy, S.K. Effect of Heat Treatment on Microstructure, Corrosion, and Shape Memory Characteristics of Laser Deposited NiTi Alloy. *Journal of Alloys and Compounds* **2018**, 744, 337–346, doi:10.1016/j.jallcom.2018.01.174.
33. Carrozza, A.; Aversa, A.; Mazzucato, F.; Bassini, E.; Manfredi, D.; Biamino, S.; Valente, A.; Fino, P. An Investigation on the Effect of Different Multi-Step Heat Treatments on the Microstructure, Texture and Mechanical Properties of the DED-Produced Ti-6Al-4V Alloy. *Materials Characterization* **2022**, 189, 111958, doi:10.1016/j.matchar.2022.111958.
34. Alegre, J.M.; Díaz, A.; García, R.; Peral, L.B.; Cuesta, I.I. Effect of HIP Post-Processing at 850 °C/200 MPa in the Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *International Journal of Fatigue* **2022**, 163, 107097, doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.107097.
35. Navickaitė, K.; Nestler, K.; Böttger-Hiller, F.; Matias, C.; Diskin, A.; Golan, O.; Garkun, A.; Strokin, E.; Biletskiy, R.; Safranchik, D.; et al. Efficient Polishing of Additive Manufactured Titanium Alloys. *Procedia CIRP* **2022**, 108, 346–351, doi:10.1016/j.procir.2022.03.057.
36. Valvez, S.; Silva, A.P.; Reis, P.N.B.; Berto, F. Annealing Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Composites. *Procedia Structural Integrity* **2022**, 37, 738–745, doi:10.1016/j.prostr.2022.02.004.
37. da Silva Barbosa Ferreira, E.; Luna, C.B.B.; Siqueira, D.D.; Araújo, E.M.; de França, D.C.; Wellen, R.M.R. Annealing Effect on Pla/Eva Blends Performance. *J Polym Environ* **2022**, 30, 541–554, doi:10.1007/s10924-021-02220-4.
38. Kuppuraj, S.; R, S.; Gopal, S. Augmenting Effect of Infill Density and Annealing on Mechanical Properties of PETG and CFPETG Composites Fabricated by FDM. *Materials Today: Proceedings* **2020**.
39. Dong, J.; Huang, X.; Muley, P.; Wu, T.; Barekati-Goudarzi, M.; Tang, Z.; Li, M.; Lee, S.; Boldor, D.; Wu, Q. Carbonized Cellulose Nanofibers as Dielectric Heat Sources for Microwave Annealing 3D Printed PLA Composite. *Composites Part B: Engineering* **2020**, 184, 107640, doi:10.1016/j.compositesb.2019.107640.
40. Ivey, M.; Melenka, G.; Carey, J.; Ayranci, C. Characterizing Short-Fiber-Reinforced Composites Produced Using Additive Manufacturing. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science* **2016**, 3, doi:10.1080/20550340.2017.1341125.

41. Papon, E.A.; Haque, A.; Spear, S.K. Effects of Functionalization and Annealing in Enhancing the Interfacial Bonding and Mechanical Properties of 3D Printed Fiber-Reinforced Composites. *Materials Today Communications* **2020**, *25*, 101365, doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101365.
42. Nassar, A.; Younis, M.; Elzareef, M.; Nassar, E. Effects of Heat-Treatment on Tensile Behavior and Dimension Stability of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Composites. *Polymers* **2021**, *13*, 4305, doi:10.3390/polym13244305.
43. Arjun, P.; Bidhun, V.K.; Lenin, U.K.; Amritha, V.P.; Pazhamannil, R.V.; Govindan, P. Effects of Process Parameters and Annealing on the Tensile Strength of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid. *Materials Today: Proceedings* **2022**, *62*, 7379–7384, doi:10.1016/j.matpr.2022.02.142.
44. Bhandari, S.; Lopez-Anido, R.A.; Gardner, D.J. Enhancing the Interlayer Tensile Strength of 3D Printed Short Carbon Fiber Reinforced PETG and PLA Composites via Annealing. *Additive Manufacturing* **2019**, *30*, 100922, doi:10.1016/j.addma.2019.100922.
45. Pei, C.; Shi, D.; Yuan, H.; Li, H. Assessment of Mechanical Properties and Fatigue Performance of a Selective Laser Melted Nickel-Base Superalloy Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A* **2019**, *759*, 278–287, doi:10.1016/j.msea.2019.05.007.
46. Bean, G.E.; McLouth, T.D.; Witkin, D.B.; Sitzman, S.D.; Adams, P.M.; Zaldivar, R.J. Build Orientation Effects on Texture and Mechanical Properties of Selective Laser Melting Inconel 718. *J. of Materi Eng and Perform* **2019**, *28*, 1942–1949, doi:10.1007/s11665-019-03980-w.
47. Poulin, J.-R.; Kreitchberg, A.; Brailovski, V. Effect of Hot Isostatic Pressing of Laser Powder Bed Fused Inconel 625 with Purposely Induced Defects on the Residual Porosity and Fatigue Crack Propagation Behavior. *Additive Manufacturing* **2021**, *47*, 102324, doi:10.1016/j.addma.2021.102324.
48. Ardi, D.T.; Guowei, L.; Maharjan, N.; Mutiargo, B.; Leng, S.H.; Srinivasan, R. Effects of Post-Processing Route on Fatigue Performance of Laser Powder Bed Fusion Inconel 718. *Additive Manufacturing* **2020**, *36*, 101442, doi:10.1016/j.addma.2020.101442.
49. Kamariah, M.S.I.N.; Harun, W.S.W.; Khalil, N.Z.; Ahmad, F.; Ismail, M.H.; Sharif, S. Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *257*, 012021, doi:10.1088/1757-899X/257/1/012021.
50. Salman, O.O.; Gammer, C.; Chaubey, A.K.; Eckert, J.; Scudino, S. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Steel Synthesized by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering: A* **2019**, *748*, 205–212, doi:10.1016/j.msea.2019.01.110.
51. Elangeswaran, C.; Cutolo, A.; Muralidharan, G.K.; de Formanoir, C.; Berto, F.; Vanmeensel, K.; Van Hooreweder, B. Effect of Post-Treatments on the Fatigue Behaviour of 316L Stainless Steel Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *International Journal of Fatigue* **2019**, *123*, 31–39, doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.01.013.
52. Zhu, Z.; Li, W.; Nguyen, Q.B.; An, X.; Lu, W.; Li, Z.; Ng, F.L.; Ling Nai, S.M.; Wei, J. Enhanced Strength–Ductility Synergy and Transformation-Induced Plasticity of the Selective Laser Melting Fabricated 304L Stainless Steel. *Additive Manufacturing* **2020**, *35*, 101300, doi:10.1016/j.addma.2020.101300.
53. Zhang, S.; Zhang, Y.; Qi, J.; Zou, Z.; Qian, Y. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Additive Manufactured Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V Alloy. *Materials* **2023**, *16*, 160, doi:10.3390/ma16010160.
54. Xu, J.; Brodin, H.; Peng, R.L.; Luzin, V.; Moverare, J. Effect of Heat Treatment Temperature on the Microstructural Evolution of CM247LC Superalloy by Laser Powder Bed Fusion. *Materials Characterization* **2022**, *185*, 111742, doi:10.1016/j.matchar.2022.111742.
55. Zhai, Y.; Huang, B.; Mao, X.; Zheng, M. Effect of Hot Isostatic Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of CLAM Steel Produced by Selective Laser Melting. *Journal of Nuclear Materials* **2019**, *515*, 111–121, doi:10.1016/j.jnucmat.2018.12.028.
56. Zhang, Z.; Wang, L.; Zhang, R.; Yin, D.; Zhao, Z.; Bai, P.; Liu, B.; Wang, F. Effect of Solution Annealing on Microstructures and Corrosion Behavior of Wire and Arc Additive Manufactured

- AZ91 Magnesium Alloy in Sodium Chloride Solution. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, 18, 416–427, doi:10.1016/j.jmrt.2022.02.092.
57. Geng, P.; Zhao, J.; Wu, W.; Wang, Y.; Wang, B.; Wang, S.; Li, G. Effect of Thermal Processing and Heat Treatment Condition on 3D Printing PPS Properties. *Polymers* **2018**, 10, 875, doi:10.3390/polym10080875.
 58. de Bruijn, A.C.; Gómez-Gras, G.; Pérez, M.A. Thermal Annealing as a Post-Process for Additively Manufactured Ultem 9085 Parts. *Procedia Computer Science* **2022**, 200, 1308–1317, doi:10.1016/j.procs.2022.01.332.
 59. Redwood, B.; Schöffner, F.; Garret, B. *The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications*; 3D Hubs B.V., 2017; ISBN 978-90-827485-0-5.
 60. Tomanik, M.; Žmudzińska, M.; Wojtków, M. Mechanical and Structural Evaluation of the PA12 Desktop Selective Laser Sintering Printed Parts Regarding Printing Strategy. *3D Print Addit Manuf* **2021**, 8, 271–279, doi:10.1089/3dp.2020.0111.
 61. Santis, R.D.; D'Amora, U.; Russo, T.; Ronca, A.; Gloria, A.; Ambrosio, L. 3D Fibre Deposition and Stereolithography Techniques for the Design of Multifunctional Nanocomposite Magnetic Scaffolds. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* **2015**, 26.
 62. Pelanconi, M.; Colombo, P.; Ortona, A. Additive Manufacturing of Silicon Carbide by Selective Laser Sintering of PA12 Powders and Polymer Infiltration and Pyrolysis. *Journal of the European Ceramic Society* **2021**, 41, 5056–5065, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.014.
 63. De Hazan, Y.; Penner, D. SiC and SiOC Ceramic Articles Produced by Stereolithography of Acrylate Modified Polycarbosilane Systems. *Journal of the European Ceramic Society* **2017**, 37, 5205–5212, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.021.
 64. * * * Additive Manufacturing: Applications and Innovations Available online: <https://www.routledge.com/Additive-Manufacturing-Applications-and-Innovations/Singh-Davim/p/book/9780367780944> (accessed on 8 September 2023).
 65. Diniță, A.; Neacșa, A.; Portoacă, A.I.; Tănase, M.; Ilinca, C.N.; Ramadan, I.N. Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics. *Materials* **2023**, 16, 4610, doi:10.3390/ma16134610.
 66. Haberland, C.; Elahinia, M.; Walker, J.; Meier, H.; Frenzel, J. On the Development of High Quality NiTi Shape Memory and Pseudoelastic Parts by Additive Manufacturing. *Smart Materials and Structures* **2014**, 23, 104002, doi:10.1088/0964-1726/23/10/104002.
 67. Xu, A. Application of 3D Printing Technology in the Field of Ceramic Material Manufacturing. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **2020**, 440, 022070, doi:10.1088/1755-1315/440/2/022070.
 68. Melenka, G.W.; Cheung, B.K.O.; Schofield, J.S.; Dawson, M.R.; Carey, J.P. Evaluation and Prediction of the Tensile Properties of Continuous Fiber-Reinforced 3D Printed Structures. *Composite Structures* **2016**, 153, 866–875, doi:10.1016/j.compstruct.2016.07.018.
 69. Bhatti, S.S.; Singh, J. 3D Printing of Biomaterials for Biomedical Applications: A Review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* **2023**, doi:10.1007/s12008-023-01525-z.
 70. Butt, J.; Bhaskar, R. Investigating the Effects of Annealing on the Mechanical Properties of FFF-Printed Thermoplastics. *JMMP* **2020**, 4, 38, doi:10.3390/jmmp4020038.
 71. Slavković, V.; Grujović, N.; Disić, A.; Radovanović, A. Influence of Annealing and Printing Directions on Mechanical Properties of PLA Shape Memory Polymer Produced by Fused Deposition Modeling.; June 20 2017.
 72. Dong, J.; Mei, C.; Han, J.; Lee, S.; Wu, Q. 3D Printed Poly(Lactic Acid) Composites with Grafted Cellulose Nanofibers: Effect of Nanofiber and Post-Fabrication Annealing Treatment on Composite Flexural Properties. *Additive Manufacturing* **2019**, 28, 621–628, doi:10.1016/j.addma.2019.06.004.
 73. Lin, D.; Xu, L.; Jing, H.; Han, Y.; Zhao, L.; Zhang, Y.; Li, H. A Strong, Ductile, High-Entropy FeCoCrNi Alloy with Fine Grains Fabricated via Additive Manufacturing and a Single Cold

- Deformation and Annealing Cycle. *Additive Manufacturing* **2020**, 36, 101591, doi:10.1016/j.addma.2020.101591.
74. Augmenting Effect of Infill Density and Annealing on Mechanical Properties of PETG and CFPETG Composites Fabricated by FDM - ScienceDirect Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320376458> (accessed on 30 March 2023).
 75. Ali, M.; Sari, R.; Sajjad, U.; Sultan, M.; Ali, H. Effect of Annealing on Microstructures and Mechanical Properties of PA-12 Lattice Structures Proceeded by Multi Jet Fusion Technology. *Additive Manufacturing* **2021**, 47, 102285, doi:10.1016/j.addma.2021.102285.
 76. Aviles, D.A. Metals An Investigation of the Microstructure and Fatigue Behavior of Additively Manufactured AISI 316L Stainless Steel with Regard to the Influence of Heat Treatment. **2023**.
 77. Zhang, M.; Sun, C.-N.; Zhang, X.; Goh, P.; Wei, J.; Li, H.; Hardacre, D. Elucidating the Relations Between Monotonic and Fatigue Properties of Laser Powder Bed Fusion Stainless Steel 316L. *JOM* **2017**, 70, doi:10.1007/s11837-017-2640-z.
 78. Nezhadfar, P.D.; Shrestha, R.; Phan, N.; Shamsaei, N. Fatigue Behavior of Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel: Synergistic Effects of Surface Roughness and Heat Treatment. *International Journal of Fatigue* **2019**, 124, 188–204, doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.02.039.
 79. Nezhadfar, P.D.; Burford, E.; Anderson-Wedge, K.; Zhang, B.; Shao, S.; Daniewicz, S.R.; Shamsaei, N. Fatigue Crack Growth Behavior of Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel: Effects of Build Orientation and Microstructure. *International Journal of Fatigue* **2019**, 123, 168–179, doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.02.015.
 80. Chmielewska, A.; Wysocki, B.; Kwaśniak, P.; Kruszewski, M.J.; Michalski, B.; Zielińska, A.; Adamczyk-Cieślak, B.; Krawczyńska, A.; Buhagiar, J.; Świąszkowski, W. Heat Treatment of NiTi Alloys Fabricated Using Laser Powder Bed Fusion (LPBF) from Elementally Blended Powders. *Materials* **2022**, 15, 3304, doi:10.3390/ma15093304.
 81. Prajapati, H.; Chalise, D.; Ravoori, D.; Taylor, R.M.; Jain, A. Improvement in Build-Direction Thermal Conductivity in Extrusion-Based Polymer Additive Manufacturing through Thermal Annealing. *Additive Manufacturing* **2019**, 26, 242–249, doi:10.1016/j.addma.2019.01.004.
 82. Wang, S.; Daelemans, L.; Fiorio, R.; Gou, M.; D'hooge, D.R.; De Clerck, K.; Cardon, L. Improving Mechanical Properties for Extrusion-Based Additive Manufacturing of Poly(Lactic Acid) by Annealing and Blending with Poly(3-Hydroxybutyrate). *Polymers* **2019**, 11, 1529, doi:10.3390/polym11091529.
 83. Hart, K.R.; Dunn, R.M.; Sietins, J.M.; Hofmeister Mock, C.M.; Mackay, M.E.; Wetzel, E.D. Increased Fracture Toughness of Additively Manufactured Amorphous Thermoplastics via Thermal Annealing. *Polymer* **2018**, 144, 192–204, doi:10.1016/j.polymer.2018.04.024.
 84. Baran, A.; Polanski, M. Microstructure and Properties of LENS (Laser Engineered Net Shaping) Manufactured Ni-Ti Shape Memory Alloy. *Journal of Alloys and Compounds* **2018**, 750, 863–870, doi:10.1016/j.jallcom.2018.03.400.
 85. Bormann, T.; Müller, B.; Schinhammer, M.; Kessler, A.; Thalmann, P.; de Wild, M. Microstructure of Selective Laser Melted Nickel–Titanium. *Materials Characterization* **2014**, 94, 189–202, doi:10.1016/j.matchar.2014.05.017.
 86. Kishore, V.; Chen, X.; Hassen, A.A.; Lindahl, J.; Kunc, V.; Duty, C. Post-Process Annealing of Large-Scale 3D Printed Polyphenylene Sulfide Composites. *Additive Manufacturing* **2020**, 35, 101387, doi:10.1016/j.addma.2020.101387.
 87. Yi, N.; Davies, R.; Chaplin, A.; McCutcheon, P.; Ghita, O. Slow and Fast Crystallising Poly Aryl Ether Ketones (PAEKs) in 3D Printing: Crystallisation Kinetics, Morphology, and Mechanical Properties. *Additive Manufacturing* **2021**, 39, 101843, doi:10.1016/j.addma.2021.101843.
 88. Li, S.; Hassanin, H.; Attallah, M.M.; Adkins, N.J.E.; Essa, K. The Development of TiNi-Based Negative Poisson's Ratio Structure Using Selective Laser Melting. *Acta Materialia* **2016**, 105, 75–83, doi:10.1016/j.actamat.2015.12.017.

89. Rane, R.; Kulkarni, A.; Prajapati, H.; Taylor, R.; Jain, A.; Chen, V. Post-Process Effects of Isothermal Annealing and Initially Applied Static Uniaxial Loading on the Ultimate Tensile Strength of Fused Filament Fabrication Parts. *Materials* **2020**, *13*, 352, doi:10.3390/ma13020352.
90. Muñoz, J.A.; Elizalde, S.; Komissarov, A.; Cabrera, J.M. Effect of Heat Treatments on the Mechanical and Microstructural Behavior of a Hypoeutectic Al Alloy Obtained by Laser Powder Bed Fusion. *Materials Science and Engineering: A* **2022**, *857*, 144091, doi:10.1016/j.msea.2022.144091.
91. Elmer, J.W.; Fisher, K.; Gibbs, G.; Sengthay, J.; Urabe, D. Post-Build Thermomechanical Processing of Wire Arc Additively Manufactured Stainless Steel for Improved Mechanical Properties and Reduction of Crystallographic Texture. *Additive Manufacturing* **2022**, *50*, 102573, doi:10.1016/j.addma.2021.102573.
92. Salarvand, V.; Sohrabpoor, H.; Mohammadi, M.A.; Nazari, M.; Raghavendra, R.; Mostafaei, A.; Brabazon, D. Microstructure and Corrosion Evaluation of As-Built and Heat-Treated 316L Stainless Steel Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, *18*, 4104–4113, doi:10.1016/j.jmrt.2022.03.156.
93. Hu, Y.; Chen, H.; Jia, X.; Liang, X.; Lei, J. Heat Treatment of Titanium Manufactured by Selective Laser Melting: Microstructure and Tensile Properties. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, *18*, 245–254, doi:10.1016/j.jmrt.2022.02.106.
94. Carrozza, A.; Aversa, A.; Fino, P.; Lombardi, M. Towards Customized Heat Treatments and Mechanical Properties in the LPBF-Processed Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Alloy. *Materials & Design* **2022**, *215*, 110512, doi:10.1016/j.matdes.2022.110512.
95. Ferreira, I.; Melo, C.; Neto, R.; Machado, M.; Alves, J.; Mould, S. Study of the Annealing Influence on the Mechanical Performance of PA12 and PA12 Fibre Reinforced FFF Printed Specimens. *Rapid Prototyping Journal* **2020**, *ahead-of-print*, doi:10.1108/RPJ-10-2019-0278.
96. Chikkanna, N.; Krishnapillai, S.; Ramachandran, V. Static and Dynamic Flexural Behaviour of Printed Polylactic Acid with Thermal Annealing: Parametric Optimisation and Empirical Modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2022**, *119*, doi:10.1007/s00170-021-08127-7.
97. Zhang, Y.; Moon, S.K. The Effect of Annealing on Additive Manufactured ULTEM™ 9085 Mechanical Properties. *Materials (Basel)* **2021**, *14*, 2907, doi:10.3390/ma14112907.
98. Akhoundi, B.; Nabipour, M.; Hajami, F.; Shakoori, D. An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High-Temperature Polylactic Acid in Fused Deposition Modeling. *Polymer Engineering & Science* **2020**, *60*, doi:10.1002/pen.25353.
99. Lluch-Cerezo, J.; Meseguer, M.D.; García-Manrique, J.A.; Benavente, R. Influence of Thermal Annealing Temperatures on Powder Mould Effectiveness to Avoid Deformations in ABS and PLA 3D-Printed Parts. *Polymers* **2022**, *14*, 2607, doi:10.3390/polym14132607.
100. Yilmaz, M.; Yilmaz, N.; Kalkan, M.F. Rheology, Crystallinity, and Mechanical Investigation of Interlayer Adhesion Strength by Thermal Annealing of Polyetherimide (PEI/ULTEM 1010) Parts Produced by 3D Printing. *Journal of Materials Engineering and Performance* **2022**, *31*, doi:10.1007/s11665-022-07049-z.
101. du Plessis, A.; Macdonald, E. Hot Isostatic Pressing in Metal Additive Manufacturing: X-Ray Tomography Reveals Details of Pore Closure. *Additive Manufacturing* **2020**, *34*, 101191, doi:10.1016/j.addma.2020.101191.
102. Wang, H.; Chen, L.; Dovguy, B.; Xu, W.; Sha, A.; Li, X.; Tang, H.; Liu, Y.; Wu, H.; Pham, M.-S. Micro-Cracking, Microstructure and Mechanical Properties of Hastelloy-X Alloy Printed by Laser Powder Bed Fusion: As-Built, Annealed and Hot-Isostatic Pressed. *Additive Manufacturing* **2021**, *39*, 101853, doi:10.1016/j.addma.2021.101853.

103. Kumar Jain, P.A.; Sattar, S.; Mulqueen, D.; Pedrazzoli, D.; Kravchenko, S.G.; Kravchenko, O.G. Role of Annealing and Isostatic Compaction on Mechanical Properties of 3D Printed Short Glass Fiber Nylon Composites. *Additive Manufacturing* **2022**, *51*, 102599, doi:10.1016/j.addma.2022.102599.
104. Liverani, E.; Lutey, A.; Ascari, A.; Fortunato, A. The Effects of Hot Isostatic Pressing (HIP) and Solubilization Heat Treatment on the Density, Mechanical Properties, and Microstructure of Austenitic Stainless Steel Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *107*, doi:10.1007/s00170-020-05072-9.
105. Grech, I.; Sullivan, J.; Lancaster, R.; Plummer, J.; Lavery, N. The Optimisation of Hot Isostatic Pressing Treatments for Enhanced Mechanical and Corrosion Performance of Stainless Steel 316L Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing* **2022**, *58*, 103072, doi:10.1016/j.addma.2022.103072.
106. van de Werken, N.; Koirala, P.; Ghorbani, J.; Doyle, D.; Tehrani, M. Investigating the Hot Isostatic Pressing of an Additively Manufactured Continuous Carbon Fiber Reinforced PEEK Composite. *Additive Manufacturing* **2021**, *37*, 101634, doi:10.1016/j.addma.2020.101634.
107. Bodziak, S.; Al-Rubaie, K.S.; Valentina, L.D.; Lafratta, F.H.; Santos, E.C.; Zanatta, A.M.; Chen, Y. Precipitation in 300 Grade Maraging Steel Built by Selective Laser Melting: Aging at 510 °C for 2 h. *Materials Characterization* **2019**, *151*, 73–83, doi:10.1016/j.matchar.2019.02.033.
108. Saedi, S.; Turabi, A.S.; Andani, M.T.; Moghaddam, N.S.; Elahinia, M.; Karaca, H.E. Texture, Aging, and Superelasticity of Selective Laser Melting Fabricated Ni-Rich NiTi Alloys. *Materials Science and Engineering: A* **2017**, *686*, 1–10, doi:10.1016/j.msea.2017.01.008.
109. Yin, S.; Chen, C.; Yan, X.; Feng, X.; Jenkins, R.; O'Reilly, P.; Liu, M.; Li, H.; Lupoi, R. The Influence of Aging Temperature and Aging Time on the Mechanical and Tribological Properties of Selective Laser Melted Maraging 18Ni-300 Steel. *Additive Manufacturing* **2018**, *22*, 592–600, doi:10.1016/j.addma.2018.06.005.
110. Park, S.J.; Park, S.J.; Son, Y.; Ahn, I.H. Reducing Anisotropy of a Part Fabricated by Material Extrusion via Warm Isostatic Pressure (WIP) Process. *Additive Manufacturing* **2022**, *55*, 102841, doi:10.1016/j.addma.2022.102841.
111. Khosravani, M.; Božić, Ž.; Zolfagharian, A.; Reinicke, T. Failure Analysis of 3D-Printed PLA Components: Impact of Manufacturing Defects and Thermal Ageing. *Engineering Failure Analysis* **2022**, *136*, 106214, doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106214.
112. Zhang, L.; Cao, W.; Zhang, Y.; Jiang, R.; Li, X. Microstructure Evolution and Enhanced Mechanical Properties of Additive Manufacturing Al-Zn-Mg-Li Alloy via Forging and Aging Treatment. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, *18*, 4965–4979, doi:10.1016/j.jmrt.2022.05.006.
113. Yang, C.; Tian, X.; Li, D.; Cao, Y.; Zhao, F.; Shi, C. Influence of Thermal Processing Conditions in 3D Printing on the Crystallinity and Mechanical Properties of PEEK Material. *Journal of Materials Processing Technology* **2017**, *248*, 1–7, doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.04.027.
114. Zhang, G.; Li, N.; Gao, J.; Xiong, H.; Yu, H.; Yuan, H. Wire-Fed Electron Beam Directed Energy Deposition of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V Alloy and the Effect of Annealing on the Microstructure, Texture, and Anisotropy of Tensile Properties. *Additive Manufacturing* **2022**, *49*, 102511, doi:10.1016/j.addma.2021.102511.
115. Conde, F.F.; Escobar, J.D.; Oliveira, J.P.; Béreš, M.; Jardini, A.L.; Bose, W.W.; Avila, J.A. Effect of Thermal Cycling and Aging Stages on the Microstructure and Bending Strength of a Selective Laser Melted 300-Grade Maraging Steel. *Materials Science and Engineering: A* **2019**, *758*, 192–201, doi:10.1016/j.msea.2019.03.129.
116. AlMangour, B.; Yang, J.-M. Improving the Surface Quality and Mechanical Properties by Shot-Peening of 17-4 Stainless Steel Fabricated by Additive Manufacturing. *Materials & Design* **2016**, *110*, 914–924, doi:10.1016/j.matdes.2016.08.037.

117. Tan, C.; Zhou, K.; Ma, W.; Zhang, P.; Liu, M.; Kuang, T. Microstructural Evolution, Nanoprecipitation Behavior and Mechanical Properties of Selective Laser Melted High-Performance Grade 300 Maraging Steel. *Materials & Design* **2017**, *134*, 23–34, doi:10.1016/j.matdes.2017.08.026.
118. Mutua, J.; Nakata, S.; Onda, T.; Chen, Z.-C. Optimization of Selective Laser Melting Parameters and Influence of Post Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Maraging Steel. *Materials & Design* **2018**, *139*, 486–497, doi:10.1016/j.matdes.2017.11.042.
119. Saedi, S.; Saghaian, S.E.; Jahadakbar, A.; Shayesteh Moghaddam, N.; Taheri Andani, M.; Saghaian, S.M.; Lu, Y.C.; Elahinia, M.; Karaca, H.E. Shape Memory Response of Porous NiTi Shape Memory Alloys Fabricated by Selective Laser Melting. *J Mater Sci Mater Med* **2018**, *29*, 40, doi:10.1007/s10856-018-6044-6.
120. Saedi, S.; Turabi, A.S.; Taheri Andani, M.; Haberland, C.; Karaca, H.; Elahinia, M. The Influence of Heat Treatment on the Thermomechanical Response of Ni-Rich NiTi Alloys Manufactured by Selective Laser Melting. *Journal of Alloys and Compounds* **2016**, *677*, 204–210, doi:10.1016/j.jallcom.2016.03.161.
121. Szust, A.; Adamski, G. Using Thermal Annealing and Salt Remelting to Increase Tensile Properties of 3D FDM Prints. *Engineering Failure Analysis* **2022**, *132*, 105932, doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105932.
122. Gruber, K.; Szymczyk-Ziółkowska, P.; Dziuba, S.; Duda, S.; Zielonka, P.; Seitzl, S.; Lesiuk, G. Fatigue Crack Growth Characterization of Inconel 718 after Additive Manufacturing by Laser Powder Bed Fusion and Heat Treatment. *International Journal of Fatigue* **2023**, *166*, 107287, doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.107287.
123. Aguado-Montero, S.; Navarro, C.; Vázquez, J.; Lasagni, F.; Slawik, S.; Domínguez, J. Fatigue Behaviour of PBF Additive Manufactured Ti6Al4V Alloy after Shot and Laser Peening. *International Journal of Fatigue* **2022**, *154*, 106536, doi:10.1016/j.ijfatigue.2021.106536.
124. Afkhami, S.; Javaheri, V.; Dabiri, E.; Piili, H.; Björk, T. Effects of Manufacturing Parameters, Heat Treatment, and Machining on the Physical and Mechanical Properties of 13Cr10Ni1.7Mo2Al0.4Mn0.4Si Steel Processed by Laser Powder Bed Fusion. *Materials Science and Engineering: A* **2021**, *832*, 142402, doi:10.1016/j.msea.2021.142402.
125. Funch, C.V.; Somlo, K.; Christiansen, T.L.; Somers, M.A.J. Thermochemical Post-Processing of Additively Manufactured Austenitic Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology* **2022**, *441*, 128495, doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128495.
126. Arana, M.; Ukar, E.; Rodriguez, I.; Aguilar, D.; Álvarez, P. Influence of Deposition Strategy and Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of 2319 Aluminium WAAM Components. *Materials & Design* **2022**, *221*, 110974, doi:10.1016/j.matdes.2022.110974.
127. Tillmann, W.; Lopes Dias, N.F.; Stangier, D.; Schaak, C.; Höges, S. Heat Treatment of Binder Jet Printed 17–4 PH Stainless Steel for Subsequent Deposition of Tribo-Functional Diamond-like Carbon Coatings. *Materials & Design* **2022**, *213*, 110304, doi:10.1016/j.matdes.2021.110304.
128. Zhang, X.X.; Lutz, A.; Andrä, H.; Lahres, M.; Gong, W.; Harjo, S.; Emmelmann, C. Strain Hardening Behavior of Additively Manufactured and Annealed AlSi3.5Mg2.5 Alloy. *Journal of Alloys and Compounds* **2022**, *898*, 162890, doi:10.1016/j.jallcom.2021.162890.
129. Pacheco, J.T.; Meura, V.H.; Bloemer, P.R.A.; Veiga, M.T.; de Moura Filho, O.C.; Cunha, A.; Teixeira, M.F. Laser Directed Energy Deposition of AISI 316L Stainless Steel: The Effect of Build Direction on Mechanical Properties in as-Built and Heat-Treated Conditions. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* **2022**, *4*, 100079, doi:10.1016/j.aime.2022.100079.
130. Zhang, Y.; Roch, A. Fused Filament Fabrication and Sintering of 17-4PH Stainless Steel. *Manufacturing Letters* **2022**, *33*, 29–32, doi:10.1016/j.mfglet.2022.06.004.
131. Cojocar, V.; Frunzaverde, D.; Miclosina, C.-O.; Marginean, G. The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review. *Polymers* **2022**, *14*, 886, doi:10.3390/polym14050886.

132. Cretu, S.-M. *MECANISME CU ROȚI DINȚATE Teorie Și Aplicații*; Editura SITECH, 2018; ISBN 978-606-11-6805-7.
133. Tunalioglu, M.S.; Agca, B.V. Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears. *Polymers* **2022**, *14*, 2064, doi:10.3390/polym14102064.
134. Rașeev, D.; Oprean, I. *Tehnologia fabricației și reparării utilajului tehnologic*; Editura Didactică și Pedagogică: București, 1983;
135. * * *ISO 6336-1-2006 PDF Available online: <https://toaz.info/doc-view-2> (accessed on 6 January 2024).
136. Antonescu, N.N.; Ion, N.; Petrescu, M.G.; Gherman, G.N. *Toleranțe și control dimensional*; Editura Universității din Ploiești: Ploiești, 1999;
137. Alghamdy, M.; Ahmad, R.; Alsayed, B. Material Selection Methodology for Additive Manufacturing Applications. *Procedia CIRP* **2019**, *84*, 486–490, doi:10.1016/j.procir.2019.04.265.
138. Hasanov, S.; Alkunte, S.; Rajeshirke, M.; Gupta, A.; Huseynov, O.; Fidan, I.; Alifui-Segbaya, F.; Rennie, A. Review on Additive Manufacturing of Multi-Material Parts: Progress and Challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* **2022**, *6*, 4, doi:10.3390/jmmp6010004.
139. * * *PolyTerra™ PLA - Polymaker Available online: <https://polymaker.com/product/polyterra-pla/> (accessed on 24 September 2023).
140. * * *PolyLite™ ABS Available online: <https://polymaker.com/product/polylite-abs/> (accessed on 24 September 2023).
141. * * *RaiseTouch E2 User Manual 2022.
142. * * *Support Center | Raise 3D Technologies Inc Available online: <https://support.raise3d.com/ideaMaker/1-1-what-is-ideamaker-15-405.html> (accessed on 16 September 2023).
143. * * *Gear Dimensions Calculator Available online: <https://evolventdesign.com/pages/blank-calc> (accessed on 21 September 2023).
144. Wu, P.; Yu, T.; Chen, M.; Hui, D. Effect of Printing Speed and Part Geometry on the Self-Deformation Behaviors of 4D Printed Shape Memory PLA Using FDM. *Journal of Manufacturing Processes* **2022**, *84*, 1507–1518, doi:10.1016/j.jmapro.2022.11.007.
145. Yadav, A.; Poorna Prakash, B.; Sai Dileep, K.; Arjuna Rao, S.; Veeresh Kumar, G.B. An Experimental Examination on Surface Finish of FDM 3D Printed Parts. *Materials Today: Proceedings* **2023**, S2214785323039561, doi:10.1016/j.matpr.2023.07.088.
146. Geng, P.; Zhao, J.; Wu, W.; Ye, W.; Wang, Y.; Wang, S.; Zhang, S. Effects of Extrusion Speed and Printing Speed on the 3D Printing Stability of Extruded PEEK Filament. *Journal of Manufacturing Processes* **2019**, *37*, 266–273, doi:10.1016/j.jmapro.2018.11.023.
147. Asadollahi-Yazdi, E.; Gardan, J.; Lafon, P. Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process. *IFAC-PapersOnLine* **2018**, *51*, 152–157, doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.250.
148. Fountas, N.A.; Kostazos, P.; Pavlidis, H.; Antoniou, V.; Manolakos, D.E.; Vaxevanidis, N.M. Experimental Investigation and Statistical Modelling for Assessing the Tensile Properties of FDM Fabricated Parts. *Procedia Structural Integrity* **2020**, *26*, 139–146, doi:10.1016/j.prostr.2020.06.017.
149. Vishwas, M.; Basavaraj, C.K.; Vinyas, M. Experimental Investigation Using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials. *Materials Today: Proceedings* **2018**, *5*, 7106–7114, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.375.
150. Ayrilmis, N. Effect of Layer Thickness on Surface Properties of 3D Printed Materials Produced from Wood Flour/PLA Filament. *Polymer Testing* **2018**, *71*, 163–166, doi:10.1016/j.polymertesting.2018.09.009.
151. Khabia, S.; Jain, K.K. Influence of Change in Layer Thickness on Mechanical Properties of Components 3D Printed on Zortrax M 200 FDM Printer with Z-ABS Filament Material & Accucraft I250+ FDM Printer with Low Cost ABS Filament Material. *Materials Today: Proceedings* **2020**, *26*, 1315–1322, doi:10.1016/j.matpr.2020.02.268.

152. Daya Karthic, R.; Joy, J.; Sakthivel, G.; Nadimpalli, R. Mechanical Characterization of 3D-Printed Kelvin Cell with Varying Infill Densities. *Materials Today: Proceedings* **2023**, 84, 41–46, doi:10.1016/j.matpr.2023.04.675.
153. Hameed, A.Z.; Aravind Raj, S.; Kandasamy, J.; Shahzad, M.A.; Baghdadi, M.A. 3D Printing Parameter Optimization Using Taguchi Approach to Examine Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Mechanical Properties. *Polymers* **2022**, 14, 3256, doi:10.3390/polym14163256.
154. Khosravani, M.R.; Berto, F.; Ayatollahi, M.R.; Reinicke, T. Characterization of 3D-Printed PLA Parts with Different Raster Orientations and Printing Speeds. *Sci Rep* **2022**, 12, 1016, doi:10.1038/s41598-022-05005-4.
155. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoaca, A.I.**; Ramadan, I. A Theoretical and Experimental Research on the Influence of FDM Parameters on Tensile Strength and Hardness of Parts Made of Polylactic Acid. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2021**, 11, 7458–7463, doi:10.48084/etasr.4311.
156. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoaca, A.I.**; Ramadan, I. A Statistical Approach of the Flexural Strength of PLA and ABS 3D Printed Parts. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, 12, 8248–8252, doi:10.48084/etasr.4739.
157. **Portoaca, A.**; Nae, I.; Zisopol, D.G.; Ramadan, I. Studies on the Influence of FFF Parameters on the Tensile Properties of Samples Made of ABS. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2022**, 1235, 012008, doi:10.1088/1757-899X/1235/1/012008.
158. Zisopol, D.G.; **Portoaca, A.I.**; Nae, I.; Ramadan, I. A Comparative Analysis of the Mechanical Properties of Annealed PLA. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, 12, 8978–8981, doi:10.48084/etasr.5123.
159. Chacón, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Núñez, P.J. Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection. *Materials & Design* **2017**, 124, 143–157, doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065.
160. * * *ISO 868:2003(En), Plastics and Ebonite — Determination of Indentation Hardness by Means of a Durometer (Shore Hardness) Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:868:ed-3:v1:en> (accessed on 16 October 2023).
161. * * *Plastics —Determination of Flexural Properties EN ISO 178:2019.
162. * * *ISO 179-1:2010 Available online: <https://www.iso.org/standard/44852.html> (accessed on 16 October 2023).
163. * * *ISO 1143:2021(En), Metallic Materials — Rotating Bar Bending Fatigue Testing Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:1143:ed-3:v1:en> (accessed on 16 October 2023).
164. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoaca, A.I.** Compression Behavior of FFF Printed Parts Obtained by Varying Layer Height and Infill Percentage. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **2022**, 12, 9747–9751, doi:10.48084/etasr.5488.
165. Zisopol, D.G.; Iacob, D.V.; **Portoaca, A.I.** A Theoretical-Experimental Study of the Influence of FDM Parameters on PLA Spur Gear Stiffness. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, 12, 9329–9335, doi:10.48084/etasr.5183.
166. Hanon, M.M.; Dobos, J.; Zsidai, L. The Influence of 3D Printing Process Parameters on the Mechanical Performance of PLA Polymer and Its Correlation with Hardness. *Procedia Manufacturing* **2021**, 54, 244–249, doi:10.1016/j.promfg.2021.07.038.
167. Vasile Ermola; Alexandru Sover; Gheorghe Nagiț; Alexandru Ionuț Irimia, Shape recovery properties of pet-based 3d printed samples. *Acta tehnica napocensis* **2022**, 65, 1117–1122.
168. Alina Popan; Ioan Alexandru Popan; Cosmin Cosma; Vasile Ceclan; Nicolae Balc Experimental study on 3d printed parts made of continuous fiberglass reinforced polymer. *Acta tehnica napocensis* **2021**, X64, 81–86.
169. de Avila, E.; Eo, J.; Kim, J.; Kim, N.P. Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers. *MATEC Web Conf.* **2019**, 264, 02001, doi:10.1051/mateconf/201926402001.

170. Şirin, Ş.; Aslan, E.; Akincioğlu, G. Effects of 3D-Printed PLA Material with Different Filling Densities on Coefficient of Friction Performance. *RPJ* **2023**, 29, 157–165, doi:10.1108/RPJ-03-2022-0081.
171. Perepelkina, S.; Kovalenko, P.; Pechenko, R.; Makhmudova, K. Investigation of Friction Coefficient of Various Polymers Used in Rapid Prototyping Technologies with Different Settings of 3D Printing. *Tribol. Ind.* **2017**, 39, 519–526, doi:10.24874/ti.2017.39.04.11.
172. Nazir, M.H.; Khan, Z.A.; Hussain, M.M.; Rahil, A.; Zaidi, S.Z.J. A Comprehensive Experimental Study and Numerical Analysis of Coefficient of Friction of Nanocomposite Coatings. *Materials Chemistry and Physics* **2023**, 301, 127550, doi:10.1016/j.matchemphys.2023.127550.
173. Zhu, L.; Xu, Y.; Liu, S.; Chen, H.; Tao, J.; Tong, X.; Li, Y.; Huang, S.; Lin, J.; Wen, C.; et al. Microstructure, Mechanical Properties, Friction and Wear Performance, and Cytotoxicity of Additively Manufactured Zirconia-Toughened Alumina for Dental Applications. *Composites Part B: Engineering* **2023**, 250, 110459, doi:10.1016/j.compositesb.2022.110459.
174. Yang, K.; Feng, X.; Xia, Y. A Synergetic Strategy Based on Texture and Nano-TiO₂ Grease to Improve the Tribological and Insulating Properties of the Matrix under Current-Carrying Friction. *Tribology International* **2023**, 183, 108379, doi:10.1016/j.triboint.2023.108379.
175. Roy, R.; Mukhopadhyay, A. Tribological Studies of 3D Printed ABS and PLA Plastic Parts. *Materials Today: Proceedings* **2021**, 41, 856–862, doi:10.1016/j.matpr.2020.09.235.
176. Maguluri, N.; Lakshmi Srinivas, Ch.; Suresh, G. Assessing the Wear Performance of 3D Printed Polylactic Acid Polymer Parts. *Materials Today: Proceedings* **2023**, S2214785323024963, doi:10.1016/j.matpr.2023.04.565.
177. Kumar, R.; Kumar, M.; Singh Chohan, J. Investigation of the Effect of Wear Behaviour of 3D Printed Electric Arc Sprayed 316L SS Coated PLA Parts. *Materials Today: Proceedings* **2023**, S2214785323002705, doi:10.1016/j.matpr.2023.01.206.
178. Hanon, M.M.; Zsidai, L. Comprehending the Role of Process Parameters and Filament Color on the Structure and Tribological Performance of 3D Printed PLA. *Journal of Materials Research and Technology* **2021**, 15, 647–660, doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.061.
179. GEORGIANA CHISIU Friction Behavior of 3D-Printed Polymeric Materials Used in Sliding Systems. *Mat.Plast*, doi:https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964.
180. Frunzaverde, D.; Cojocaru, V.; Ciubotariu, C.-R.; Miclosina, C.-O.; Ardeljan, D.D.; Ignat, E.F.; Marginean, G. The Influence of the Printing Temperature and the Filament Color on the Dimensional Accuracy, Tensile Strength, and Friction Performance of FFF-Printed PLA Specimens. *Polymers* **2022**, 14, 1978, doi:10.3390/polym14101978.
181. Dawoud, M.; Taha, I.; Ebeid, S.J. Effect of Processing Parameters and Graphite Content on the Tribological Behaviour of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene: Einfluss von Prozessparametern Und Graphitgehalt Auf Das Tribologische Verhalten von 3D-Druck Acrylnitril-Butadien-Styrol Bauteilen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech* **2015**, 46, 1185–1195, doi:10.1002/mawe.201500450.
182. Dangnan, F.; Espejo, C.; Liskiewicz, T.; Gester, M.; Neville, A. Friction and Wear of Additive Manufactured Polymers in Dry Contact. *Journal of Manufacturing Processes* **2020**, 59, 238–247, doi:10.1016/j.jmapro.2020.09.051.
183. Aziz, R.; Ul Haq, M.I.; Raina, A. Effect of Surface Texturing on Friction Behaviour of 3D Printed Polylactic Acid (PLA). *Polymer Testing* **2020**, 85, 106434, doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106434.
184. Amiruddin, H.; Abdollah, M.F.B.; Norashid, N.A. Comparative Study of the Tribological Behaviour of 3D-Printed and Moulded ABS under Lubricated Condition. *Mater. Res. Express* **2019**, 6, 085328, doi:10.1088/2053-1591/ab2152.
185. Akincioğlu, G.; Şirin, E.; Aslan, E. Tribological Characteristics of ABS Structures with Different Infill Densities Tested by Pin-on-Disc. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2023**, 237, 1224–1234, doi:10.1177/13506501231153521.

186. Maries, I.-T.; Vilau, C.; Pustan, M.S.; Dudescu, C.; Crisan, H.G. Determining the Tribological Properties of Different 3D Printing Filaments. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2020**, *724*, 012022, doi:10.1088/1757-899X/724/1/012022.
187. Dhakal, N.; Wang, X.; Espejo, C.; Morina, A.; Emami, N. Impact of Processing Defects on Microstructure, Surface Quality, and Tribological Performance in 3D Printed Polymers. *Journal of Materials Research and Technology* **2023**, *23*, 1252–1272, doi:10.1016/j.jmrt.2023.01.086.
188. Nazir, M.H.; Khan, Z.A.; Hussain, M.M.; Rahil, A.; Zaidi, S.Z.J. A Comprehensive Experimental Study and Numerical Analysis of Coefficient of Friction of Nanocomposite Coatings. *Materials Chemistry and Physics* **2023**, *301*, 127550, doi:10.1016/j.matchemphys.2023.127550.
189. Agrawal, A.P.; Kumar, V.; Kumar, J.; Paramasivam, P.; Dhanasekaran, S.; Prasad, L. An Investigation of Combined Effect of Infill Pattern, Density, and Layer Thickness on Mechanical Properties of 3D Printed ABS by Fused Filament Fabrication. *Heliyon* **2023**, *9*, e16531, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e16531.
190. Shahrjerdi, A.; Karamimoghadam, M.; Bodaghi, M. Enhancing Mechanical Properties of 3D-Printed PLAs via Optimization Process and Statistical Modeling. *J. Compos. Sci.* **2023**, *7*, 151, doi:10.3390/jcs7040151.
191. Sahoo, S.; Sutar, H.; Senapati, P.; Shankar Mohanto, B.; Ranjan Dhal, P.; Kumar Baral, S. Experimental Investigation and Optimization of the FDM Process Using PLA. *Materials Today: Proceedings* **2023**, *74*, 843–847, doi:10.1016/j.matpr.2022.11.208.
192. Jaisingh Sheoran, A.; Kumar, H. Fused Deposition Modeling Process Parameters Optimization and Effect on Mechanical Properties and Part Quality: Review and Reflection on Present Research. *Materials Today: Proceedings* **2020**, *21*, 1659–1672, doi:10.1016/j.matpr.2019.11.296.
193. * * *U.S.I.C.T., Guru Gobind Singh Indraprastha University, Delhi-110078, India; Singh, M.; Bharti, P.S.; U.S.I.C.T., Guru Gobind Singh Indraprastha University, Delhi-110078, India Grey Relational Analysis Based Optimization of Process Parameters for Efficient Performance of Fused Deposition Modelling Based 3D Printer. *JER is an international, peer-reviewed journal that publishes full-length original research papers, reviews, case studies in all areas of Engineering* **2022**, doi:10.36909/jer.ICMET.17159.
194. Mushtaq, R.T.; Iqbal, A.; Wang, Y.; Rehman, M.; Petra, M.I. Investigation and Optimization of Effects of 3D Printer Process Parameters on Performance Parameters. *Materials* **2023**, *16*, 3392, doi:10.3390/ma16093392.
195. Al-Tamimi, A.A.; Tlija, M.; Abidi, M.H.; Anis, A.; Abd Elgawad, A.E.E. Material Extrusion of Multi-Polymer Structures Utilizing Design and Shrinkage Behaviors: A Design of Experiment Study. *Polymers* **2023**, *15*, 2683, doi:10.3390/polym15122683.
196. Rodríguez-Reyna, S.L.; Mata, C.; Díaz-Aguilera, J.H.; Acevedo-Parra, H.R.; Tapia, F. Mechanical Properties Optimization for PLA, ABS and Nylon + CF Manufactured by 3D FDM Printing. *Materials Today Communications* **2022**, *33*, 104774, doi:10.1016/j.mtcomm.2022.104774.
197. Selvam, A.; Mayilswamy, S.; Whenish, R.; Naresh, K.; Shanmugam, V.; Das, O. Multi-Objective Optimization and Prediction of Surface Roughness and Printing Time in FFF Printed ABS Polymer. *Sci Rep* **2022**, *12*, 16887, doi:10.1038/s41598-022-20782-8.
198. Waseem, M.; Habib, T.; Ghani, U.; Abas, M.; Jan, Q.; Khan, M. Optimization of Tensile and Compressive Behavior of PLA 3-D Printed Parts Using Categorical Response Surface Methodology. *International Journal of Industrial and Systems Engineering* **2022**, *41*, 417–437, doi:10.1504/IJISE.2020.10034682.
199. Nguyen, V.H.; Huynh, T.N.; Nguyen, T.P.; Tran, T.T. Single and Multi-Objective Optimization of Processing Parameters for Fused Deposition Modeling in 3D Printing Technology. *IJAME* **2020**, *17*, 7542–7551, doi:10.15282/ijame.17.1.2020.03.0558.

200. Vanaei, H.R.; Khelladi, S.; Tcharkhtchi, A. Roadmap: Numerical-Experimental Investigation and Optimization of 3D-Printed Parts Using Response Surface Methodology. *Materials* **2022**, *15*, 7193, doi:10.3390/ma15207193.
201. Nazan, M.; Ramli, F.; Alkahari, M.R.; Sudin, M.N.; Abdullah, M. Process Parameter Optimization of 3D Printer Using Response Surface Method. *ARPN journal of engineering and applied sciences* **2017**, *12*.
202. Vardhan Rai, H.; Kumar Modi, Y.; Pare, A. Process Parameter Optimization for Tensile Strength of 3D Printed Parts Using Response Surface Methodology. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2018**, *377*, 012027, doi:10.1088/1757-899X/377/1/012027.
203. A.E, T.; L, R.; R.V, E.; D.K, B. Optimization of 3D-Printer Process Parameters for Improving Quality of Polylactic Acid Printed Part. *IJET* **2017**, *9*, 589–600, doi:10.21817/ijet/2017/v9i2/170902044.
204. Waseem, M.; Salah, B.; Habib, T.; Saleem, W.; Abas, M.; Khan, R.; Ghani, U.; Siddiqi, M.U.R. Multi-Response Optimization of Tensile Creep Behavior of PLA 3D Printed Parts Using Categorical Response Surface Methodology. *Polymers* **2020**, *12*, 2962, doi:10.3390/polym12122962.
205. Aslani, K.-E.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.D.; Vaxevanidis, N.M.; Manolakas, D.E. On the Application of Grey Taguchi Method for Benchmarking the Dimensional Accuracy of the PLA Fused Filament Fabrication Process. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*, 1016, doi:10.1007/s42452-020-2823-z.
206. John, J.; Devjani, D.; Ali, S.; Abdallah, S.; Pervaiz, S. Optimization of 3D Printed Polylactic Acid Structures with Different Infill Patterns Using Taguchi-Grey Relational Analysis. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* **2023**, *6*, 62–78, doi:10.1016/j.aiepr.2022.06.002.
207. Shakeria, Z.; Benfriha, K.; Zirak, N.; Shirinbayan, M. *Optimization of FFF Processing Parameters to Improve Geometrical Accuracy and Mechanical Behavior of Polyamide 6 Using Grey Relational Analysis (GRA)*; In Review, 2021;
208. Garg, P.K.; Singh, R.; Ahuja, I. Multi-Objective Optimization of Dimensional Accuracy, Surface Roughness and Hardness of Hybrid Investment Cast Components. *RPJ* **2017**, *23*, 845–857, doi:10.1108/RPJ-10-2015-0149.
209. Venkatasubbareddy, O.Y.; Siddikali, P.; Saleem, S.M. Improving the Dimensional Accuracy And Surface Roughness of Fdm Parts Using Optimization Techniques. *IOSR* **2016**, *16*, 18–22, doi:10.9790/1684-16053041822.
210. Kumar, K.; Singh, H. Multi-Objective Optimization of Fused Deposition Modeling for Mechanical Properties of Biopolymer Parts Using the Grey-Taguchi Method. *Chin. J. Mech. Eng.* **2023**, *36*, 30, doi:10.1186/s10033-023-00847-z.
211. Shakeri, Z.; Benfriha, K.; Shirinbayan, M.; Ahmadifar, M.; Tcharkhtchi, A. Mathematical Modeling and Optimization of Fused Filament Fabrication (FFF) Process Parameters for Shape Deviation Control of Polyamide 6 Using Taguchi Method. *Polymers* **2021**, *13*, 3697, doi:10.3390/polym13213697.
212. Şirin, Ş.; Aslan, E.; Akincioğlu, G. Effects of 3D-Printed PLA Material with Different Filling Densities on Coefficient of Friction Performance. *RPJ* **2023**, *29*, 157–165, doi:10.1108/RPJ-03-2022-0081.
213. Roy, R.; Mukhopadhyay, A. Tribological Studies of 3D Printed ABS and PLA Plastic Parts. *Materials Today: Proceedings* **2021**, *41*, 856–862, doi:10.1016/j.matpr.2020.09.235.
214. Rîpeanu, R.G. Cercetări Privind Creșterea Durabilității Cuplei Cilindru-Piston Din Componenta Pompelor de Extracție, Teză de Doctorat. Teză de doctorat, Universitatea Petrol - Gaze din Ploiești, 2003.
215. * * *Minitab 19 Statistical Software.
216. Gunjal, S.; Dabhade, R.; Dabhade, V. A Review on Design of Experimental Analysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* **2015**, *3*.
217. Portoacă, A.I.; Ripeanu, R.G.; Diniță, A.; Tănase, M. Optimization of 3D Printing Parameters for Enhanced Surface Quality and Wear Resistance. *Polymers* **2023**, *15*, 3419, doi:10.3390/polym15163419.

218. Mani, M.; Karthikeyan, A.G.; Kalaiselvan, K.; Muthusamy, P.; Muruganandhan, P. Optimization of FDM 3-D Printer Process Parameters for Surface Roughness and Mechanical Properties Using PLA Material. *Materials Today: Proceedings* **2022**, 66, 1926–1931, doi:10.1016/j.matpr.2022.05.422.
219. Palacios, P.A.; Velazquez, A.; Zelaya, R.; Patterson, A.E. Shore Hardness of As-Printed and Dehydrated Thermoplastic Materials Made Using Fused Filament Fabrication (FFF). *Materials Today Communications* **2023**, 35, 105971, doi:10.1016/j.mtcomm.2023.105971.
220. Chohan, J.S.; Singh, R.; Boparai, K.S. Parametric Optimization of Fused Deposition Modeling and Vapour Smoothing Processes for Surface Finishing of Biomedical Implant Replicas. *Measurement* **2016**, 94, 602–613, doi:10.1016/j.measurement.2016.09.001.
221. Hanon, M.M.; Zsidai, L. Comprehending the Role of Process Parameters and Filament Color on the Structure and Tribological Performance of 3D Printed PLA. *Journal of Materials Research and Technology* **2021**, 15, 647–660, doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.061.
222. Maguluri, N.; Suresh, G.; Guntur, S.R. Effect of Printing Parameters on the Hardness of 3D Printed Poly-Lactic Acid Parts Using DOE Approach. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2022**, 1248, 012004, doi:10.1088/1757-899X/1248/1/012004.
223. Vishwas, M.; Basavaraj, C.K.; Vinyas, M. Experimental Investigation Using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials. *Materials Today: Proceedings* **2018**, 5, 7106–7114, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.375.
224. Tamașag, I.; Beșliu-Băncescu, I.; Severin, T.-L.; Dulucianu, C.; Cerlincă, D.-A. Experimental Study of In-Process Heat Treatment on the Mechanical Properties of 3D Printed Thermoplastic Polymer PLA. *Polymers* **2023**, 15, 2367, doi:10.3390/polym15102367.
225. Hikmat, M.; Rostam, S.; Ahmed, Y.M. Investigation of Tensile Property-Based Taguchi Method of PLA Parts Fabricated by FDM 3D Printing Technology. *Results in Engineering* **2021**, 11, 100264, doi:10.1016/j.rineng.2021.100264.
226. Singh, J.; Goyal, K.K.; Sharma, R. Impact of FDM Variables on the Tensile Property of 3D Printed CF-PLA Parts. *Materials Today: Proceedings* **2023**, S2214785323040968, doi:10.1016/j.matpr.2023.07.226.
227. Rasheed, A.; Hussain, M.; Ullah, S.; Ahmad, Z.; Kakakhail, H.; Riaz, A.A.; Khan, I.; Ahmad, S.; Akram, W.; Eldin, S.M.; et al. Experimental Investigation and Taguchi Optimization of FDM Process Parameters for the Enhancement of Tensile Properties of Bi-Layered Printed PLA-ABS. *Mater. Res. Express* **2023**, 10, 095307, doi:10.1088/2053-1591/acf1e7.
228. Alafaghani, A.; Qattawi, A.; Alrawi, B.; Guzman, A. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing* **2017**, 10, 791–803, doi:10.1016/j.promfg.2017.07.079.
229. Vlăsceanu, D. Materiale Compozite Pentru Aplicații În Medicină Și Inginerie, Obținute Prin Fabricație Aditivă, Teză de Doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, 2021.
230. Weng, Z.; Wang, J.; Senthil, T.; Wu, L. Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing. *Materials & Design* **2016**, 102, 276–283, doi:10.1016/j.matdes.2016.04.045.
231. Benwood, C.; Anstey, A.; Andrzejewski, J.; Misra, M.; Mohanty, A.K. Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid). *ACS Omega* **2018**, 3, 4400–4411, doi:10.1021/acsomega.8b00129.
232. Altan, M.; Eryildiz, M.; Gumus, B.; Kahraman, Y. Effects of Process Parameters on the Quality of PLA Products Fabricated by Fused Deposition Modeling (FDM): Surface Roughness and Tensile Strength. *Materials Testing* **2018**, 60, 471–477, doi:10.3139/120.111178.
233. Kumar, D. Optimization the Process Parameter of FDM 3D Printer Using Taguchi Method for Improving the Tensile Strength.

234. Cláudio, R.A.; Dupont, J.; Baptista, R.; Leite, M.; Reis, L. Behaviour Evaluation of 3D Printed Polylactic Acid under Compression. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, *21*, 4052–4066, doi:10.1016/j.jmrt.2022.10.042.
235. Zisopol, D.G.; Ion, N.; **Portoaca, A.I.** Comparison of the Charpy Resilience of Two 3D Printed Materials: A Study on the Impact Resistance of Plastic Parts. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **2023**, *13*, 10781–10784, doi:10.48084/etasr.5876.
236. Zisopol, D.G.; **Portoaca, A.I.**; Tanase, M. Improving the Impact Resistance through Annealing in PLA 3D Printed Parts. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **2023**, *13*, 11768–11772, doi:10.48084/etasr.6281.
237. Caminero, M.A.; Chacón, J.M.; García-Moreno, I.; Rodríguez, G.P. Impact Damage Resistance of 3D Printed Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modelling. *Composites Part B: Engineering* **2018**, *148*, 93–103, doi:10.1016/j.compositesb.2018.04.054.
238. Wu, W.; Jiang, J.; Jiang, H.; Liu, W.; Li, G.; Wang, B.; Tang, M.; Zhao, J. Improving Bending and Dynamic Mechanics Performance of 3D Printing through Ultrasonic Strengthening. *Materials Letters* **2018**, *220*, 317–320, doi:10.1016/j.matlet.2018.03.048.
239. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoaca, A.I.**; Ramadan, I. A Statistical Approach of the Flexural Strength of PLA and ABS 3D Printed Parts. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, *12*, 8248–8252, doi:10.48084/etasr.4739.
240. Travieso-Rodriguez, J.A.; Zandi, M.D.; Jerez-Mesa, R.; Lluma-Fuentes, J. Fatigue Behavior of PLA-Wood Composite Manufactured by Fused Filament Fabrication. *Journal of Materials Research and Technology* **2020**, *9*, 8507–8516, doi:10.1016/j.jmrt.2020.06.003.
241. Azadi, M.; Dadashi, A.; Dezhianian, S.; Kianifar, M.; Torkaman, S.; Chiyani, M. High-Cycle Bending Fatigue Properties of Additive-Manufactured ABS and PLA Polymers Fabricated by Fused Deposition Modeling 3D-Printing. *Forces in Mechanics* **2021**, *3*, 100016, doi:10.1016/j.finmec.2021.100016.
242. Buj-Corral, I.; Zayas-Figueras, E.E. Comparative Study about Dimensional Accuracy and Form Errors of FFF Printed Spur Gears Using PLA and Nylon. *Polymer Testing* **2023**, *117*, 107862, doi:10.1016/j.polymertesting.2022.107862.
243. * * *ANSI/AGMA 1106-A97 - Tooth Proportions for Plastic Gears (Metric Version of ANSI/AGMA 1006-A97) Available online: <https://webstore.ansi.org/standards/agma/ansiagma1106a97> (accessed on 27 December 2023).
244. * * *AGMA 920-A01 - Materials For Plastic Gears Available online: <https://pdfcoffee.com/agma-920-a01-materials-for-plastic-gears-3-pdf-free.html> (accessed on 26 December 2023).
245. * * * ISO 1328-1:2013 Available online: <https://www.iso.org/standard/45309.html> (accessed on 27 December 2023).
246. * * *Thermoplastic Gears Design Directive: VDI 2736. *Stagnoli EN*.
247. * * *Lewis Factor Equation for Gear Tooth Calculations Available online: <https://www.engineersedge.com/gears/lewis-factor.htm> (accessed on 27 November 2023).
248. JULA, A. *Proiectarea Angrenajelor Evolventice*; Editura Scrisul Românesc: Craiova, 1989;
249. Lias, M.; Sharif, Z.; Awang, M.; Jailani, A.; Warap, H. Quasi-Static Modeling of Spur Gear Time Varying Strength Analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences* **2017**, *12*, 1938–1947.
250. Karimpour, M.; Dearn, K.D.; Walton, D. A Kinematic Analysis of Meshing Polymer Gear Teeth. *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. L-J. Mater.-Design Appl.* **2010**, *224*, 101–115, doi:10.1243/14644207JMDA315.
251. Li, X.; Jiang, S.; Li, C.; Huang, B. Statics analysis of cylindrical gear drive at any meshing position based on ansys. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **2005**, *47*.
252. Zeng, Q.L.; Wang, K.; Wan, L.R.; Zhang, X. Accurate Modelling and Transient Meshing Analysis of Involute Spur Gear Based on the Principle of Gear Shaping. *Int. j. simul. model.* **2017**, *16*, 322–333, doi:10.2507/IJSIMM16(2)CO7.

253. * * *Solid Edge Siemens.
254. Bogdan-Roth, M.; Romanet, M. Dispozitiv de încercare la rupere a dinților roților dințate circulare cu dinți drepți, Brevet de Invenție Oficiul de Stat Pentru Invenții Și Mărci, București, Nr. A/00014 2022.
255. Bogdan-Roth, M. Cercetări Teoretice și experimentale privind construcția și funcționarea angrenajelor cu roți dințate necirculare confecționate din necuron 1300, Teză de Doctorat, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2022.
256. * * *Idea Maker Software.
257. Suniya, N.K.; Verma, A.K. A Review on Optimization of Process Parameters of Fused Deposition Modeling. *Res. Eng. Struct. Mater.* **2023**, doi:10.17515/resm2022.520ma0909.
258. * * *Gear Test Rig - A Review | PDF | Gear | Transmission (Mechanics) Available online: <https://www.scribd.com/document/493225117/Gear-Test-Rig-A-Review> (accessed on 2 June 2023).
259. Ionel Sorin, G. Contribuții la reducerea excitațiilor parametrice la angrenajele cilindrice cu dinți înclinați, Teză de Doctorat, Universitatea politehnica din bucurești: București, 2017.
260. Drăguț, G. Contribuții la analiza dinamică a unui sistem mecanic pentru evaluarea calității angrenajelor cilindrice, Teză de Doctorat, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București: Craiova, 2019.
261. Hoskins, T.J.; Dearn, K.D.; Chen, Y.K.; Kukureka, S.N. The Wear of PEEK in Rolling–Sliding Contact – Simulation of Polymer Gear Applications. *Wear* **2014**, 309, 35–42, doi:10.1016/j.wear.2013.09.014.
262. Harsha, K.M.; Seetharama Rao, Y.; Jagannadha Rao, D. Comparison of Wear Behaviour of Polymer Spur Gears Using FDM Process. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2021**, 1168, 012028, doi:10.1088/1757-899X/1168/1/012028.
263. Mao, K.; Li, W.; Hooke, C.J.; Walton, D. Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears. *Wear* **2009**, 267, 639–645, doi:10.1016/j.wear.2008.10.005.
264. Bogdan-Roth, M.; Zisopol, D.G.; **Portoaca, A.I.**; Romanet, M.; Mihail, M.; Diniță, A.; Nae, I.; Ripeanu, R.G. Stand Pentru Testarea La Oboseală a Roților Dințate Din Materiale Plastice Cu Citirea Automată a Valorii Momentului Si a Valorii Uzurii Dinților, Cerere Brevet de Invenție Oficiul de Stat Pentru Invenții Și Mărci, București, Nr. A/00877 2023.
265. Zhang, Y.; Pursell, C.; Mao, K.; Leigh, S. A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears. *Tribology International* **2020**, 141, 105953, doi:10.1016/j.triboint.2019.105953.
266. Pogačnik, A.; Tavčar, J. An Accelerated Multilevel Test and Design Procedure for Polymer Gears. *Materials & Design (1980-2015)* **2015**, 65, 961–973, doi:10.1016/j.matdes.2014.10.016.
267. Pisula, J.; Budzik, G.; Turek, P.; Cieplak, M. An Analysis of Polymer Gear Wear in a Spur Gear Train Made Using FDM and FFF Methods Based on Tooth Surface Topography Assessment. *Polymers* **2021**, 13, 1649, doi:10.3390/polym13101649.
268. Dennig, H.-J.; Zumofen, L.; Kirchheim, A. Feasibility Investigation of Gears Manufactured by Fused Filament Fabrication. In *Industrializing Additive Manufacturing*; Meboldt, M., Klahn, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2021; pp. 304–320 ISBN 978-3-030-54333-4.
269. Gbadeyan, O.J.; Mohan, T.P.; Kanny, K. Processing and Characterization of 3D-Printed Nanoclay/Acrylonitrile Butadiene Styrene (Abs) Nanocomposite Gear. *Int J Adv Manuf Technol* **2020**, 109, 619–627, doi:10.1007/s00170-020-05648-5.
270. Tunalioglu, M.S.; Torun, T. The Investigation of Wear on Three-Dimensional Printed Spur Gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* **2021**, 235, 2027–2034, doi:10.1177/09544089211027732.
271. Bryła, J.; Martowicz, A.; Petko, M.; Gac, K.; Kobus, K.; Kowalski, A. Wear Analysis of 3D-Printed Spur and Herringbone Gears Used in Automated Retail Kiosks Based on Computer Vision and Statistical Methods. *Materials* **2023**, 16, 5554, doi:10.3390/ma16165554.

272. Tunalioglu, M.S.; Agca, B.V. Wear and Service Life of 3-D Printed Polymeric Gears. *Polymers* **2022**, *14*, 2064, doi:10.3390/polym14102064.
273. Evans, S.M.; Keogh, P.S. Wear Mechanisms in Polyoxymethylene Spur Gears. *Wear* **2019**, *428–429*, 356–365, doi:10.1016/j.wear.2019.03.027.
274. Flodin, A.; Andersson, S. Wear Simulation of Spur Gears. *Tribotest* **1999**, *5*, 225–249, doi:10.1002/tt.3020050303.
275. * * *Certificat de Calibrare Kern DAkkS 963-101 2023.
276. Laze, D. Studii și cercetări privind îmbunătățirea sistemului de frânare la autovehicule comerciale, Teză de Doctorat - Rezumat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca: Cluj-Napoca, 2021.
277. Ghazali, W.B.M.; Idris, D.M.N.B.D.; Sofian, A.H.B.; Basrawi, M.F.B.; Ibrahim, T.K. Investigation on Wear Characteristic of Biopolymer Gear. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *257*, 012068, doi:10.1088/1757-899X/257/1/012068.
278. Portoaca, A.I.; Zisopol, D.G.; Ripeanu, R.G.; Nae, I.; Tanase, M. Accelerated Testing of the Wear Behavior of 3D-Printed Spur Gears. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **2024**, *14*, 13845–13850, doi:10.48084/etasr.7113.

7. Listă de publicații

1. **Portoacă, A.I.**; Nae, I. Additive Manufacture. Applications in the Petroleum and Petrochemical Industry. *Roumanian Journal of Petroleum & Gas Technology* **2021**, *3*.
2. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoacă, A.I.**; Ramadan, I. A Theoretical and Experimental Research on the Influence of FDM Parameters on Tensile Strength and Hardness of Parts Made of Polylactic Acid. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2021**, *11*, 7458–7463, doi:10.48084/etasr.4311 (IF 2022: 1.5, Q2).
3. **Portoacă, A.I.**; Nae, I.; Zisopol, D.G.; Ramadan, I. Studies on the Influence of FFF Parameters on the Tensile Properties of Samples Made of ABS. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2022**, *1235*, 012008, doi:10.1088/1757-899X/1235/1/012008 (IF 2022: 1.5, Q2).
4. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoacă, A.I.**; Ramadan, I. A Statistical Approach of the Flexural Strength of PLA and ABS 3D Printed Parts. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, *12*, 8248–8252, doi:10.48084/etasr.4739 (IF 2022: 1.5, Q2).
5. Zisopol, D.G.; **Portoacă, A.I.**; Nae, I.; Ramadan, I. A Comparative Analysis of the Mechanical Properties of Annealed PLA. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, *12*, 8978–8981, doi:10.48084/etasr.5123 (IF 2022: 1.5, Q2).
6. Zisopol, D.G.; Iacob, D.V.; **Portoacă, A.I.** A Theoretical-Experimental Study of the Influence of FDM Parameters on PLA Spur Gear Stiffness. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, *12*, 9329–9335, doi:10.48084/etasr.5183 (IF 2022: 1.5, Q2).
7. Zisopol, D.G.; Nae, I.; **Portoacă, A.I.** Compression Behavior of FFF Printed Parts Obtained by Varying Layer Height and Infill Percentage. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2022**, *12*, 9747–9751, doi:10.48084/etasr.5488 (IF 2022: 1.5, Q2).
8. Zisopol, D.G.; Ion, N.; **Portoacă, A.I.** Comparison of the Charpy Resilience of Two 3D Printed Materials: A Study on the Impact Resistance of Plastic Parts. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2023**, *13*, 10781–10784, doi:10.48084/etasr.5876 (IF 2022: 1.5, Q2).
9. Diniță, A.; Neacșa, A.; **Portoacă, A.I.**; Tănase, M.; Ilinca, C.N.; Ramadan, I.N. Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics. *Materials* **2023**, *16*, 4610, doi:10.3390/ma16134610 (IF 2022: 3.4, Q2).

10. Zisopol, D.G.; **Portoacă, A.I.**; Tanase, M. Dimensional Accuracy of 3D Printed Dog-Bone Tensile Samples: A Case Study. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2023**, *13*, 11400–11405, doi:10.48084/etasr.6060 (IF 2022: 1.5, Q2).
11. **Portoacă, A.I.**; Ripeanu, R.G.; Diniță, A.; Tănase, M. Optimization of 3D Printing Parameters for Enhanced Surface Quality and Wear Resistance. *Polymers* **2023**, *15*, 3419, doi:10.3390/polym15163419 (IF 2022: 5, Q1).
12. Zisopol, D.G.; Tănase, M.; **Portoacă, A.I.** Innovative Strategies for Technical-Economical Optimization of FDM Production. *Polymers* **2023**, *15*, 3787, doi:10.3390/polym15183787 (IF 2022: 5, Q1).
13. Zisopol, D.G.; **Portoacă, A.I.**; Tanase, M. Improving the Impact Resistance through Annealing in PLA 3D Printed Parts. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2023**, *13*, 11768–11772, doi:10.48084/etasr.6281 (IF 2022: 1.5, Q2).
14. **Portoacă, A.I.**; Zisopol, D.G.; Ripeanu, R.G.; Nae, I.; Tanase, M. Accelerated Testing of the Wear Behavior of 3D-Printed Spur Gears. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **2024**, *14*, 13845–13850, doi:10.48084/etasr.7113 (IF 2022: 1.5, Q2).
15. **Portoacă, A.I.**; Diniță, A.; Tănase, M.; Săvulescu, A.; Sirbu, E.E.; Călin, C.; Brănoiu, G. Analyzing Sustainable 3D Printing Processes: Mechanical, Thermal, and Crystallographic Insights. *Polymers* **2024**, *16*, 1364, doi:10.3390/polym16101364.
16. Bogdan-Roth, M.; Zisopol, D.G.; **Portoacă, A.I.**; Romanet, M.; Mihail, M.; Diniță, A.; Nae, I.; Ripeanu, R.G. Stand pentru testarea la oboseală a roților dințate din materiale plastice cu citirea automată a valorii momentului și a valorii uzurii dinților, Cerere Brevet de Invenție Oficiul de Stat Pentru Invenții Și Mărci, București, Nr. A/00877 2023.

Lucrările publicate au următoarele citări:

Publicația	Citări Google Academic	Citări Web of Science
1	0	0
2	31	20
3	15	0
4	28	20
5	21	14
6	13	10
7	13	9
8	8	5
9	20	12
10	6	3
11	12	7
12	6	2
13	4	1
14	0	0
15	0	0