



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: INGINERIE TEHNOLOGICĂ ŞI MANAGEMENT INDUSTRIAL

Drd. Ing. George Răzvan BUICAN

**Cercetări privind fabricarea prin topire
selectivă cu laserul a pieselor din oţel inox
316 L**

**Research Regarding Manufacturing of 316L
Stainless Steel Parts Using Selective Laser
Melting Process (SLM)**

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător ştiinţific

Prof.dr.ing. Gheorghe OANCEA

BRAŞOV, 2019

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov

Nr. din

PREȘEDINTE: Prof. dr. ing. CLINCIU Ramona
Prodecan Facultatea ITMI Universitatea Transilvania din Brașov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof. dr. ing. OANCEA Gheorghe
Universitatea Transilvania din Brașov

REFERENȚI: Prof. dr. ing. BERCE Petru Nicolae
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Prof. dr. ing. BÂLC Nicolae
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Prof. dr. ing. DRĂGOI Mircea Viorel
Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 7 Iunie 2019, ora 12:30, sala VIII6

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa: buican.george@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS (lb. română)

	Pg. teza	Pg. rezumat
LISTA DE NOTAȚII.....	7	
LISTA DE ABREVIERI.....	10	
Prefață.....	11	11
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive.....	14	14
1.1. Introducere.....	14	14
1.2. Scurt istoric al fabricației aditive reflectat în brevete acordate pe plan internațional.....	15	15
1.3. Scurt istoric al fabricației aditive din punctul de vedere al evoluției pe piața internațională.....	15	15
1.4. Fabricația aditivă.....	33	16
1.4.1. Avantaje și dezavantaje.....	33	
1.4.2. Clasificarea procedeeleor de fabricație.....	37	
1.4.3. Metodologia fabricației aditive.....	40	
1.5. Tipuri de procedee de fabricație aditivă.....	45	16
1.5.1. Stereolitografia (Stereolithography - SLA).....	45	
1.5.2. Depunere de material topit (FDM).....	46	
1.5.3. Fabricarea de piese stratificate din foi laminate (Laminated Object Manufacturing - LOM).....	47	
1.5.4. Sinterizare selectivă cu laser (Selective Laser Sintering - SLS).....	49	
1.5.5. Topirea selectivă cu laser (Selective Laser Melting - SLM).....	50	16
1.6. Direcțiile de cercetare privind procedeul de topire selectivă cu laser - SLM.....	51	17
1.6.1. Pulberile metalice folosite în SLM.....	53	
1.6.2. Cercetări privind parametrii de lucru utilizați în procedeul SLM.....	54	
1.6.3. Cercetări privind microstructura și proprietățile fizico-mecanice ale pieselor obținute prin SLM.....	54	
1.7. Concluzii.....	55	19
Capitolul 2. Obiectivele tezei de doctorat.....	56	21
Capitolul 3. Microduritatea pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul.....	57	22

3.1. Metode de determinare a durității.....	58	22
3.1.1. Metoda Rockwell de determinare a durității.....	58	
3.1.2. Metoda Vickers de determinare a durității.....	59	22
3.1.3. Microduritatea Vickers.....	62	24
3.2. Fabricarea pieselor utilizând procedeul SLM.....	62	24
3.3. Postprocesarea pieselor pentru măsurarea microdurității.....	67	27
3.4. Măsurarea microdurității Vickers.....	69	28
3.5. Interpretarea rezultatelor.....	62	31
3.6. Analiza valorilor aberante. Metoda rangurilor.....	75	31
3.6.1. Metoda rangurilor limită.....	75	
3.6.2. Calculul rangurilor limită.....	76	
3.7. Caracterizarea statistică a eșantioanelor de date.....	77	31
3.8. Analiza statistică a microdurității interne.....	87	33
3.8.1. Analiza din punctul de vedere al mărimii stratului de fabricație, luându-se în considerare poziția de aplicare a forței de măsurare și poziționarea pe masa de fabricație.....	87	33
3.8.2. Analiza statistică a microdurității interne din punctul de vedere al mărimii stratului de fabricație, luându-se în considerare poziția de aplicare a forței de măsurare.....	114	34
3.8.3. Analiza statistică a microdurității interne din punct de vedere al mărimii stratului de fabricație.....	132	35
3.9. Concluzii.....	136	36
3.9.1. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm].....	136	36
3.9.2. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm].....	138	38
3.9.3. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm] și 50[μm].....	140	39
3.9.4.Recomandări pentru fabricarea pieselor metalice prin procesul SLM utilizând strategiile de fabricație de 30[μm] și 50[μm].....	142	42
Capitolul 4. Microstructura pieselor fabricate prin topire selectivă cu laserul.....	144	44
4.1. Metodologie de analiza a modificărilor microstructurii pieselor fabricate cu straturi de grosime de 30 și 50 micrometri.....	144	44
4.2. Analiza pieselor de tip oval fabricate cu strat de 30 [μm] și 50[μm].....	146	46
4.2.1. Analiza piesei O 30 UM FP cu factor de mărire 200X, suprafață perpendiculară pe stratul de fabricație – Imaginea 1.....	147	

4.2.2. Analiza piesei O 30 UM FP cu factor de mărire 200X, suprafață perpendiculară pe stratul de fabricație – Imaginea 2.....	150	
4.2.3. Analiza piesei O 30 UM FII cu factor de mărire 200X, suprafață paralelă cu stratul de fabricație – Imaginea 3.....	152	
4.2.4. Analiza piesei O 30 UM FII cu factor de mărire 200X, suprafață paralelă cu stratul de fabricație – Imaginea 4.....	153	
4.2.5. Analiza piesei O 50 UM FP cu factor de mărire 200X, suprafață perpendiculară cu stratul de fabricație – Imaginea 1.....	155	
4.2.6. Analiza piesei O 50 UM FP cu factor de mărire 200X, suprafață perpendiculară pe stratul de fabricație – Imaginea 2.....	156	
4.2.7. Analiza piesei O 50 UM FII cu factor de mărire 200X, suprafață paralelă cu stratul de fabricație – Imaginea 3.....	158	
4.2.8. Analiza piesei O 50 UM FII cu factor de mărire 200X, suprafață paralelă cu stratul de fabricație – Imaginea 4.....	159	
4.3. Analiza datelor cumulate pentru imaginile cu factor de mărire 200X aferente piesele codificate O 30 UM si O 50 UM.....	161	51
4.3.1. Analiza datelor cumulate pentru imaginile aferente piesei codificată O 30 UM.....	161	51
4.3.2. Analiza datelor cumulate pentru imaginile aferente piesei codificată O 50 UM.....	162	52
4.4 Concluzii.....	164	53
Capitolul 5. Studii de caz.....	166	56
5.1. Refabricarea produselor industriale.....	166	56
5.1.1. Scanarea 3D cu comet L3D.....	170	59
5.1.2. Generarea modelului CAD asociat roții dințate.....	171	59
5.1.3. Generarea strategiilor de lucru pentru fabricația aditivă.....	174	61
5.1.4. Fabricarea roții dințate pe echipamentul SLM 250 HL.....	177	62
5.2. Fabricarea unui molar mandibular și a primului molar utilizând procedeul SLM.....	180	62
5.2.1. Analiza posibilităților de poziționare a Molarului mandibular.....	181	63
5.2.2. Analiza posibilităților de poziționare a primul premolar.....	188	64
5.2.3. Stabilirea strategiei de fabricație și a parametrilor de lucru.....	194	66
5.2.4. Fabricarea molarului mandibular și a primului premolar pe mașina SLM 250-HL.....	199	67
5.3. Concluzii.....	202	68
Capitolul 6. Concluzii finale. Contribuții personale. Diseminarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare.....	204	70
6.1. Concluzii finale.....	204	70
6.2. Contribuții personale.....	205	71

6.3. Diseminarea rezultatelor.....	206	72
6.4. Direcții viitoare de cercetare.....	206	72
7. BIBLIOGRAFIE.....	208	74
LISTĂ FIGURI.....	220	
LISTĂ TABELE.....	229	
ANEXE.....	232	
Scurt rezumat (română /engleză).....	304	81
CV.....	305	82

CUPRINS (lb. engleză)

	Pg. teza	Pg. rezumat
LIST OF NOTES.....	7	
LIST OF ABBREVIATIONS.....	10	
Preface.....	11	11
Chapter 1. The current state of research in the field of additive manufacturing.....	14	14
1.1. Introduction.....	14	14
1.2. Brief history of additive manufacturing reflected in international patents.....	15	15
1.3. Brief History of Additive Manufacturing in terms of Evolution on the International Market.....	15	15
1.4. Additive manufacturing.....	33	16
1.4.1. Advantages and disadvantages.....	33	
1.4.2. Classification of manufacturing processes.....	37	
1.4.3. Additive manufacturing methodology.....	40	
1.5. Types of additive manufacturing processes.....	45	16
1.5.1. Stereolithography - SLA.....	45	
1.5.2. Fused Deposition Modeling - FDM.....	46	
1.5.3. Laminated Object Manufacturing - LOM.....	47	
1.5.4. Selective Laser Sintering - SLS.....	49	
1.5.5. Selective Laser Melting - SLM.....	50	16
1.6. Research directions for the selective laser melting process- SLM.....	51	17
1.6.1. Metal powders used in SLM.....	53	
1.6.2. Researches on the working parameters used in the SLM process.....	54	
1.6.3. Research on microstructure and mechanical properties of parts obtained by SLM.....	54	
1.7. Conclusions.....	55	19

Chapter 2. Objectives of the PhD thesis	56	21
Chapter 3. The microdurability of parts manufactured by the selective laser melting process ...	57	22
3.1. Methods for determining the hardness.....	58	22
3.1.1. Rockwell method for hardness determination.....	58	
3.1.2. Vickers method for determining hardness.....	59	22
3.1.3. Vickers microhardness.....	62	24
3.2. Manufacture of parts using the SLM process.....	62	24
3.3. Post-processing of parts for microhardness measurement.....	67	27
3.4. Measuring Vickers microhardness.....	69	28
3.5. Interpretation of results.....	62	31
3.6. Analysis of outlier values. Rank method.....	75	31
3.6.1. Limit rank method.....	75	
3.6.2. Limit rank calculation.....	76	
3.7. Statistical characterization of data samples.....	77	31
3.8. Statistical analysis of internal microhardness.....	87	33
3.8.1. Analysis in terms of the size of the manufacturing layer, taking into account the direction of application of the measuring force and position of the part in accordance with the building tabel.....	87	33
3.8.2. Statistical analysis of internal microhardness in terms of size of the manufacturing layer, taking into account the position of application of the measuring force.....	114	34
3.8.3. Statistical analysis of internal microhardness in terms of size of the manufacturing layer.....	132	35
3.9. Conclusions.....	136	36
3.9.1. Parts manufactured with a powder layer of 30 [μm].....	136	36
3.9.2. Parts manufactured with a powder layer of 50[μm].....	138	38
3.9.3. Parts manufactured with powder layers of 30[μm] and 50[μm].....	140	39
3.9.4. Recommendations for the manufacture of metal parts through the SLM process using the manufacturing strategies of 30 [μm] and 50 [μm].....	142	42
Chapter 4. Microstructure of the parts manufactured by selective laser melting	144	44
4.1. Methodology for the analysis of microstructure changes of manufactured parts with layer thicknesses of 30 and 50 microns.....	144	44

4.2. Analysis of oval-shaped parts made up of 30 [μm] and 50 [μm]	146	46
4.2.1. Part Analysis O 30 UM FP with 200X magnification factor, surface perpendicular to the manufacturing layer - Figure 1	147	
4.2.2. Part Analysis O 30 UM FP with 200X magnification factor, surface perpendicular to the manufacturing layer - Figure 2	150	
4.2.3. Part Analysis O 30 UM FII with 200X magnification factor, parallel to the manufacturing layer - Figure 3	152	
4.2.4. Part Analysis O 30 UM FII with 200X magnification factor, parallel to the manufacturing layer - Figure 4	153	
4.2.5. Part Analysis O 50 UM FP with magnification factor 200X, surface perpendicular to the manufacturing layer - Figure 1	155	
4.2.6. Part Analysis O 50 UM FP with 200X magnification factor, surface perpendicular to the manufacturing layer - Figure 2	156	
4.2.7. Part Analysis O 50 UM FII with 200X magnification factor, parallel to the manufacturing layer - Figure 3	158	
4.2.8. Part Analysis O 50 UM FII with 200X magnification factor, parallel to the manufacturing layer - Figure 4	159	
4.3. Analysis of aggregated data for 200X magnification images related to coded pieces O 30 UM and O 50 UM	161	51
4.3.1. Analyze the cumulative data for images of the coded piece O 30 UM	161	51
4.3.2. Analysis the cumulative data for images of the coded piece O 50 UM	162	52
4.4 Conclusions	164	53
Chapter 5. Case studies	166	56
5.1. Remanufacture of industrial products	166	56
5.1.1. 3D scan with L3D comet scanner	170	59
5.1.2. Generate the CAD model associated with the gear	171	59
5.1.3. Generate working strategies for additive manufacturing	174	61
5.1.4 Manufacture of the gear on the SLM 250 HL	177	62
5.2. Manufacture of a mandibular molar and the first molar using the SLM process	180	62
5.2.1. Analyzing the Possibilities of Positioning the Molar Mandibular	181	63
5.2.2. Analyzing the possibilities of positioning the first premolar	188	64
5.2.3. Establishment of manufacturing strategy and working parameters	194	66
5.2.4. Manufacture of the mandibular molar and the first premolar on the SLM 250-HL machine	199	67
5.3. Conclusions	202	68
Chapter 6. Final conclusions. Personal contributions. Dissemination of results. Future research directions	204	70

6.1. Final conclusions.....	204	70
6.2. Personal contributions.....	205	71
6.3. Dissemination of results.....	206	72
6.4. Future research directions.....	206	72
7. BIBLIOGRAPHY.....	208	74
LIST FIGURES.....	220	
LIST OF TABLES.....	229	
ANNEXES.....	232	
Short abstract (Romanian / English).....	304	81
CV.....	305	82

Prefață

Tehnologiile de fabricație aditivă au avut o dezvoltare majoră în ultima perioadă datorită beneficiilor pe care le aduc. Dintre acestea se pot aminti: realizarea pieselor cu forme complexe, multitudinea de opțiuni pe care le oferă legate de designul exterior al piesei și nu în ultimul rând, posibilitatea de modificare facilă a formei produsului finit fără a mai fi necesară o pregătire suplimentară de fabricație.

Beneficiile integrării procedeele de fabricație aditivă în procesele tehnologice sunt multiple. Astfel, se pot aminti: utilizarea unei game mici de dispozitive și eventual scule, reducerea numărului de operații efectuate până la obținerea produsului finit, eliminarea stocurilor de piese, acestea fiind fabricate doar la cerere, și nu în ultimul eliminarea reziduurilor tehnologice generate în procesul de fabricație cum ar fi șpanul și lichidelor de ungere și lubrifiere. În comparație cu tehnologiile convenționale, tehnologiile aditive au un impact mult mai mic asupra mediului înconjurător, în primul rând datorită materiei prime ce poate fi reutilizată, procedeele de fabricație aditivă fiind utile în direcția dezvoltării durabile.

Unul dintre procedeele importante de fabricație aditivă este topirea selectivă cu laserul. Utilizând procedeul se obțin piese metalice ce au o densitate de aproximativ 99% din cea a unei piese turnate, dar și proprietăți fizico-mecanice asemănătoare pieselor fabricate prin tehnologiile convenționale. Prin acest procedeu se fabrică piese cu complexitate ridicată, într-un timp relativ scurt, ce sunt în unele situații gata de montaj.

Prezenta teză de doctorat, intitulată „**CERCETĂRI PRIVIND FABRICAREA PRIN TOPIRE SELECTIVĂ CU LASERUL A PIESELOR DIN OȚEL INOX 316 L**”, este structurată în 6 capitole și cuprinde studii și cercetări asupra pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul.

Capitolul 1 al acestei lucrări, intitulat „**Stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive**”, prezintă, pe scurt, stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive, cu accent pe materialele metalice.

Cele mai utilizate procedee de fabricație aditivă pe plan mondial sunt sterolitografierea, depunerea de material topit, fabricarea de piese stratificate din foi laminate, sinterizare selectivă cu laser și nu în ultimul rând topirea selectivă cu laserul. Aceste metode utilizează o gamă variată de materiale, de la material sub formă lichidă, fir sau placă la material sub formă de pulbere. Majoritatea procedeele de fabricație aditivă metalice folosesc ca materie primă pulberea metalică realizată dintr-un singur metal sau aliaj.

În cadrul capitolului, s-a realizat și o analiză a direcțiilor de cercetare în domeniul fabricației aditive utilizând procesul de topire selectivă cu laserul. Din această analiză sau desprins următoarele direcții de cercetare la nivel internațional:

- îmbunătățirea procesului de fabricație pentru a se obține piese cu proprietăți superioare, cu mărirea productivității și reducerea costurilor de fabricație;
- modelarea matematică a procesului de fabricație aditivă prin topire selectivă cu laserul;
- optimizarea parametrilor de lucru pentru materiale și aliaje noi;
- corelarea parametrilor de fabricație cu proprietățile fizico-mecanice ale pieselor fabricate.

Capitolul 2 al tezei de doctorat intitulat „**Obiectivele tezei de doctorat**”, evidențiază, după cum spune și titlul, obiectivele investigațiilor științifice pentru prezenta teză de doctorat.

În **Capitolul 3** al lucrării intitulat „**Microduritatea pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul**”, se prezintă cercetările privind influența poziționării pieselor de diferite configurații, pe masa de lucru și a grosimii stratului de fabricație, asupra microdurității. Astfel, au fost fabricate două seturi de piese utilizând strategii diferite de fabricație, una ce folosește un strat de pulbere cu grosimea de 30 [μm] și alta ce folosește un strat de grosime 50 [μm]. Odată fabricate, piesele au fost secționare după două direcții, una perpendiculară pe stratul de fabricație și alta paralelă cu stratul de fabricație, pentru a se realiza măsurarea microdurității Vickers interne a pieselor.

Rezultatele măsurătorilor au fost supuse unei analize statistice pentru a se analiza influența pe care anumiți parametri o au asupra microdurității interne. Parametrii studiați au fost:

- poziționarea piesei în raport cu masa de fabricație;
- direcția de măsurare a microdurității;
- grosimea stratului de fabricație.

În **Capitolul 4** intitulat „**Microstructura pieselor fabricate prin topire selectivă cu laserul**” sunt prezentate cercetările desfășurate privind influența poziționării pieselor de diferite configurații, pe masa de lucru și a grosimii stratului de fabricație, asupra microstructurii.

Piese fabricate utilizând două strategii diferite de fabricație, una ce folosește un strat de pulbere cu grosimea de 30 [μm] și alta ce folosește un strat de grosime 50 [μm] au fost pregătite pentru analiza metalografică prin tratarea cu apă regală pentru a scoate în evidență structura internă a materialului. Suprafața obținută a fost analizată la microscop utilizând un factor de mărire de 200X. Folosind metodele statistice s-au analizat imaginile și s-a analizat influența grosimii stratului de fabricație asupra structurii interne a materialului.

Capitolul 5 al tezei de doctorat intitulat „**Studii de caz**”, prezintă două studii de caz pentru fabricarea pieselor utilizând procedeul topirii selective cu laserul, unul referitor la refabricarea unei piese deteriorate din componența unui ansamblu, pentru care nu mai există documentație tehnică, și unul referitor la analiza influenței poziționării piesei pe masa de lucru asupra timpului de fabricație, în cazul fabricării unui molar mandibular și a unui premolar.

În primul studiu de caz a fost fabricată o roată dințată deteriorată pentru care nu mai există documentație tehnică. Acesta a fost mai întâi scanată utilizând un scanner 3D, după care, cu norul de puncte obținut, s-a generat o reprezentare 3D a obiectului. Reprezentarea a fost prelucrată pentru a putea fi eliminate toate defectele piesei și în final a rezultat un nou model CAD al unei piese ce poate fi fabricată. Roata dințată a fost fabricată din oțel inox 316L, utilizând procedeul de topire selectivă cu laserul.

În al doilea studiu de caz s-au fabricat doi dinți, un molar mandibular și un premolar în vederea utilizării lor în procesul de testare la oboseală a instrumentelor dentare. Pe lângă fabricația propriuzisă a dinților s-a analizat și influența pe care o are poziția piesei pe masa de lucru asupra timpului de fabricație și a posibilității de finalizare a piesei.

În ultimul capitol al tezei intitulat „**Concluzii finale. Contribuții personale. Diseminarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare**” sunt formulate concluzii și sunt evidențiate principalele contribuții

teoretice și experimentale ale autorului. De asemenea, tot aici, sunt propuse și direcții de continuare a cercetărilor.

Doresc să mulțumesc conducătorului științific domnului Prof. Dr. Ing. Gheorghe Oancea care cu multă răbdare, competență și înțelegere m-a îndrumat și susținut în lungul drum parcurs în realizarea acestei lucrări.

Mulțumesc tuturor colegilor din departamentul de Ingineria fabricației, pentru susținerea și sprijinul acordat pe parcursul elaborării tezei.

Sincere mulțumiri adresez *Prof.dr.ing. Constantin BUZATU* și *Prof.dr.ing. Ionel MARTINESCU* care m-au încurajat și sprijinit în a duce la bun sfârșit acest proiect.

Nu în ultimul rând, mulțumesc familiei mele, în special soției Andreea și fetiței Georgiana Marina, dar și părinților Nicolaie și Marina și surorii Roxana Marina cu soțul Florin pentru sprijinul moral și răbdarea de care au dat dovadă pe parcursul elaborării acestei teze.

Această teză a fost finanțată și susținută de **Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013 (SOP HRD), ID134378** finanțat de **FONDUL SOCIAL EUROPEAN și Guvernul României**. De asemenea prin proiectul cu fonduri structurale **PRO-DD (POS-CCE, O.2.2.1, ID 123, SMIS 2637, ctr. No 11/2009)** s-a realizat accesul infrastructura folosită în această teză de doctorat.

Autor: BUICAN George Răzvan

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive

1.1. Introducere

Odată cu evoluția cunoașterii și a tehnologiei, pe plan mondial se modifică, în mod continuu, cerințele privind metodele de fabricație. Dacă până în prezent tehnologiile tradiționale și producția de masă satisfăceau cerințele, acum, odată cu creșterea complexității produselor industriale, a cerințelor legate de protecția mediului înconjurător și a conservării resurselor, sunt necesare noi tehnologii de fabricație. Răspunsul la aceste cerințe se regăsește, în principal, în tehnologiile de fabricație aditivă (Additive Manufacturing - AM) [WOH11].

Fabricația aditivă este definită de Asociația Americană pentru Testarea Materialelor (ASTM – American Society for Testing and Materials, www.astm.org) ca “procesul de îmbinare a materialelor, de obicei strat cu strat, în vederea realizării de obiecte tridimensionale pornind de la modelele de date 3D disponibile în fișierele CAD, proces complet diferit de metodologiile de fabricație substructive”. Fabricația aditivă este, conform ASTM F2792, termenul oficial din industrie, având ca sinonim foarte des folosit Imprimarea 3D (3D printing - 3DP).

În prezent, tehnologiile AM sunt folosite în industria medicală pentru fabricarea implanturilor dentare și a implanturilor osoase în serie mică, mijlocie și unicat [RAJ08, PAR11, OAN13, LEO15a, PES16, COS16, PES17, RUS17, BOR17, MAN18, TUR18]. AM se întâlnește și în industria aerospațială pentru fabricarea produselor finite ce intră în componența avioanelor de linie. Metodele de fabricație aditivă sunt întâlnite și în alte domenii cum ar fi: industria electronică și a produselor de consum, industria constructoare de mașini, industria militară și artă [WOH12].

Istoria fabricației aditive începe pe la mijlocul anilor 1960. Fabricația aditivă a fost cunoscută inițial sub denumirea de prototipare rapidă (RP – Rapid Prototyping), deoarece aceste tehnologii erau utilizate la obținerea de prototipuri. Pe măsură ce procesele și cerințele de calitate au evoluat, piața s-a extins și în acest moment, tehnologiile de fabricație aditivă sunt folosite, inclusiv în fabricația de produse finite.

În prezent, există o multitudine de procedee de fabricație aditivă. Unele dintre cele mai vechii fiind considerate LOM (Layered Object Manufacturing – fabricarea obiectelor din foi laminate) și SLA (Stereolithography - stereolitografie). Procedeele mai recente includ sinterizare selectivă cu laser (SLS), sinterizare directă cu laser (Direct Metal Laser Sintering – DMLS), topirea selectivă cu laser (Selectiv Laser Melting – SLM), tehnologi inkjet, FDM (Fused Deposition Modeling), matricele Polyjet și altele [BOU09, WOH14].

În ultimi ani, anumite echipamente din domeniu au făcut obiectul unor îmbunătățiri continue, iar acum ele pot concura cu cele tradiționale, din punctul de vedere al prețului, vitezei, fiabilității și al costurilor de utilizare. Acest lucru a condus la o extindere a folosirii AM în aproape toate domeniile. Extinderea AM a favorizat și industria de creare a softurilor ce permit utilizarea tehnologiilor, mult mai eficient, într-un mod personalizat. O altă caracteristică ce a dus la creșterea competitivității a fost diversificarea tipului și a numărului de materiale folosite. Mașinile moderne pot utiliza o gamă largă de materiale precum sticlă, ceramică, polimeri, fotopolimeri, ceară, materiale plastice, metale și aliaje ale acestora.

Pe măsură ce viteza, fiabilitatea și precizia sistemelor hardware se îmbunătățesc, tehnologiile aditive ar putea să înlocuiască sau să fie pe o scară largă complementare metodelor tradiționale de fabricație. Unul dintre avantajele cel mai des întâlnite este acela că tehnologiile de fabricație aditivă elimină o mare parte din efortul depus de forța de muncă în obținerea pe cale tradițională a produselor. Eficiența din punctul de vedere al energiei consumate, este un alt avantaj important al acestor tehnologii.

1.2. Scurt istoric al fabricației aditive reflectat în brevete acordate pe plan internațional

Istoria tehnologiilor de fabricație aditivă poate fi observată cel mai bine prin evoluția brevetelor depuse în acest domeniu. Prezentul studiu a fost realizat pe biblioteca de brevete emise de Biroul de Brevete al Statelor Unite dar și de cel al Uniunii Europene. Având în vedere multitudinea de brevete depuse au fost alese pentru exemplificare doar cele mai semnificative.

În urma cercetării bibliografice întreprinse, se poate observa ca interesul pentru fabricația aditivă este prezent încă din ani 1900 prin procedee ce poartă numele de fotosculptură sau prin procedee ce își doresc să reproducă cu acuratețe hărțile geologice [BOU09]. Aceste procedee au evoluat treptat în procedeele de fabricație aditivă actuale.

1.3. Scurt istoric al fabricației aditive din punctul de vedere al evoluției pe piața internațională

Istoria procedeelelor de fabricație aditivă poate fi studiată prin prisma brevetelor depuse în acest domeniu, însă, deținerea unui brevet de invenție nu garantează succesul unei tehnologii, metode sau echipament. Succesul final este dat de mai mulți factori economici și tehnologici precum:

- costul de implementare al tehnologiei;
- suportul tehnic;
- complexitatea tehnologiei;
- costurile de operare;
- ușurința în utilizare;
- materia primă;
- legislația;
- competiția;
- cererea și utilitatea echipamentului și a produselor fabricate.

Datorită factorilor tehnico-economici, unele tehnologii au evoluat, creând în jurul lor companii mari, ce s-au extins la nivel internațional (Stratasys, 3D Systems, Magics etc.), altele au fost cumpărate de concurență pentru a se putea păstra segmentul de piață deschis, altele au evoluat, iar altele au fost pur și simplu eliminate din piață.

Ținând cont de aceste caracteristici se pot plasa, în context istoric, procedeele de fabricație aditivă, de această dată luând în considerare și factori tehnico-economici, nu doar pe cei de natură legislativă și inovativă.

1.4. Fabricația aditivă

Deoarece prototiparea rapidă (Rapid Prototyping – RP), poate fi considerată parte din tehnologiile de fabricație aditivă, avantajele și dezavantajele acestei tehnologii se regăsesc și în cazul fabricației aditive. Pentru a se putea face o analiză corectă a beneficiilor tehnologiilor de fabricație aditivă trebuie ținut cont de limitările și avansurile tehnologice ale metodelor și procedeele de fabricație aditivă. Pentru comparație se folosesc, în principal, tehnologiile convenționale cu îndepărtare de material, însă, cu cât problemele tehnice ale fabricației aditive vor fi rezolvate, cu atât balanța se va înclina către aceste tehnologii, datorită beneficiilor pe care le aduc.

1.5. Tipuri de procedee de fabricație aditivă

Cele mai cunoscute tipuri de procedee de fabricație aditivă sunt:

- Stereolitografia (SLA);
- Depunere de material topit (FDM);
- Fabricarea de piese stratificate din foi laminate (LOM);
- Sinterizare selectivă cu laser (SLS);
- Topirea selectivă cu laser (Selective Laser Melting - SLM).

1.5.5. Topirea selectivă cu laser (Selective Laser Melting - SLM)

Topirea selectivă cu laser (Selective Laser Melting) este un procedeu de fabricație aditivă care folosește fișierele 3D CAD ca sursă de informație digitală, și energie sub forma unei raze laser de mare energie, pentru a obține piese metalice tridimensionale prin topirea pulberilor metalice [BAL10, UDR12, UDR17a, COS18].

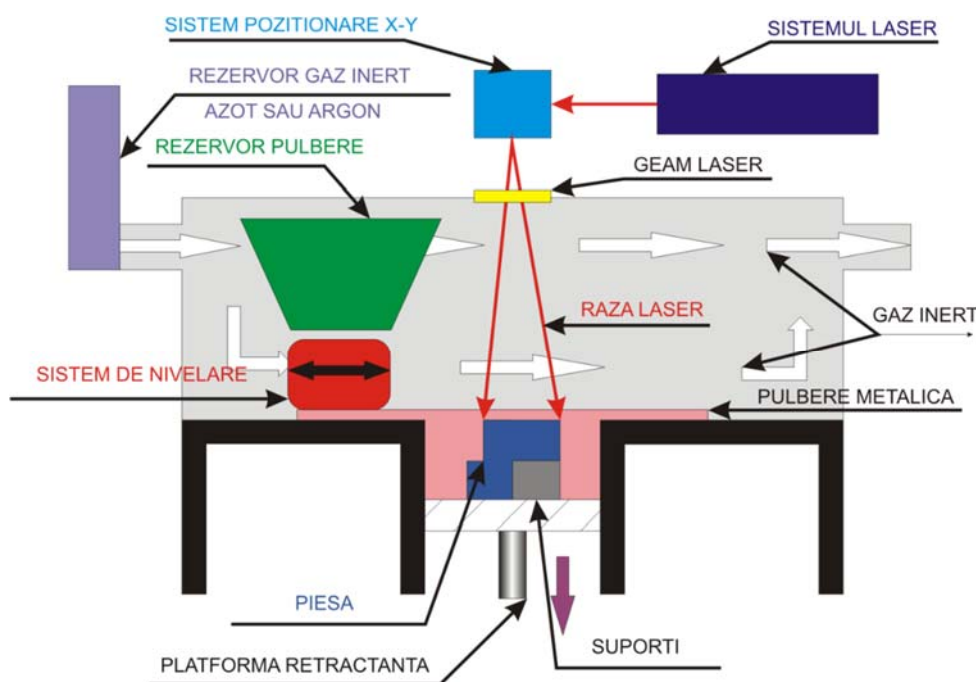


Fig. 1.1. Principul de funcționare al SLM [MEI96, UDR12, UDR17a]

Procedeul SLM a fost creat în 1995 la Fraunhofer Institute ILT din Aachen, Germania, în cadrul unui proiect de cercetare ce a avut ca rezultat brevetul ILT SLM patent DE 19649865 [FRA96]. Încă din faza de pionerat Dr. Dieter Schwarze și Dr. Matthias Fockele de la F&S Stereolithographietechnik GmbH au avut o strânsă colaborare cu cercetătorii de la ILT, Dr. Wilhelm Meiners și Dr. Konrad Wissenbach.

Comitetul de standardizare internațional ASTM F42 a grupat SLM în categoria "sinterizări cu laser", chiar dacă acest lucru este oarecum greșit deoarece procesul topește complet metalul într-o masă solidă omogenă, spre diferență de sinterizarea selectivă cu laser (Selective Laser Sintering – SLS) și sinterizarea metalică directă cu laser (Direct Metal Laser Sintering – DMLS), care sunt în realitate procese de sinterizare. Un proces asemănător SLM este procesul de topire cu rază de electroni (Electron Beam Melting – EBM) [KAL14], care folosește ca sursă de energie o rază de electroni [BAL10, COS18].

Procesul SLM pornește cu secționarea în straturi cu grosimi între 20 și 100 micrometri a fișierului 3D CAD și generarea a câte o imagine 2D pentru fiecare strat. Această informație este salvată într-un fișier de tip STL. Fișierul STL este apoi încărcat într-un pachet de programe de postprocesare ce precizează parametrii de lucru și generează suportii de fabricare ce permit ca fișierul să fie interpretat și rulat pe diferite tipuri de mașini.

Se topesc selectiv straturi subțiri de pulbere metalică atomizată, pulbere care este distribuită cu ajutorul unui mecanism de împrăștiere pe un placă de substrat (sau construcție), de obicei metalică, ce este fixată pe o masă de indexare cu deplasare pe axa verticală (Z). Toate acestea au loc într-o cameră ce are o atmosferă controlată de gaz inert, azot sau argon cu nivel de oxigen sub 500 părți/milion.

După distribuirea unui strat de pulbere, fiecare secțiune 2D a geometriei piesei este îmbinată prin topirea selectivă cu laser a pulberii metalice. Acest lucru este realizat cu o rază laser de mare putere, de obicei un laser de tip ytterbium care are o putere de sute sau mii de wați. Raza laser este ghidată pe axele X și Y cu ajutorul a două oglinzi de înaltă frecvență. Energia laserului este suficient de intensă încât să permită topirea completă (sudarea) particulelor pentru a crea o formă metalică solidă. Procesul este repetat strat cu strat până când piesa este fabricată în totalitate [MEI96, MEI11].

1.6. Direcțiile de cercetare privind procedeul de topire selectivă cu laser - SLM

În urma consultării literaturii de specialitate s-au identificat mai multe direcții de cercetare legate de domeniul fabricației aditive prin procedeul de topire selectivă cu laser - SLM.

Prima direcție de cercetare este *studiul pulberilor folosite în procesul SLM*. Mai exact, se dorește definirea caracteristicilor pe care trebuie să le aibă aceste pulberi precum și crearea și utilizarea de noi pulberi [LI10, GU10, HAG10, ZHA10, KHA10].

O a doua direcție de cercetare se referă la *studiul parametrilor de lucru*, aici regăsindu-se două direcții de studiu diferite :

- definirea parametrilor optimi de lucru pentru un regim de lucru existent [LI10, HAN15, ALI18];
- definirea parametrilor de lucru pentru regimuri noi de funcționare [KHA10, SUN16].

O alta direcție de cercetare este îndreptată în rezolvarea uneia din problemele cu care se confruntă procesul de fabricație prin topirea selectivă cu laser, *obținerea pieselor cu o densitate de 100% și cu o*

porozitate mică [LI10]. Aceste aspecte sunt generate de o îmbinare insuficientă a straturilor sau de o topirea parțială a pulberii metalice [ZAE10].

Studiul pulberilor metalice folosite in SLM	<ul style="list-style-type: none"> •caracteristicile pulberilor folosite in SLM. [LI10]; •noi pulberi pentru procesul SLM. [GU10, HAG10, ZHA10, KHA10];
Studiul parametrilor de lucru SLM	<ul style="list-style-type: none"> •definirea parametrilor optimi de lucru [LI10, HAN15, SUN16]; •definirea parametrilor de lucru pentru alte regimuri de funcționare [ZAE10, SUN16] ;
Obținerea de piese cu densitatea mare prin procedeul SLM	<ul style="list-style-type: none"> •metode de a îmbunătății procesul pentru a obține piese cu până la 99% densitate[THI10] ; •motivele pentru care nu se realizează îmbinarea straturilor[THI10];
Diferite metale și aliaje folosite in SLM	<ul style="list-style-type: none"> •oțel inox [LI10]; •aluminu [LOU11]; •oțel de scule [ZHA10]; •titan [THI10]; •materiale ceramice [HAG10]; •compozite [HAG10, LI10b]; •nichel [ZHA10];
Simularea procesului SLM	<ul style="list-style-type: none"> •simularea cu Ansys pentru generarea de parametri[LI10b]; •simularea cu Ansys pentru obținerea de măsurători a tensiunilor existente [ZAE10, LI10b]; •simularea cu coduri proprietare [ZAE10, YAD10, AHM16, AHM16b, PAP17]; •algoritmi de poziționare [DIE14];
Studierea folosirii de noi materiale in SLM	<ul style="list-style-type: none"> •tungsten [ZHA10]; •aur [KHA10]; •aluminu [LOU11]; •ceramici [HAG10]; •compozite [ZHA10, LI10b];
Studierea microstructurii și a proprietăților fizico-chimice ale pieselor obținute prin SLM	<ul style="list-style-type: none"> •studiul microstructurii[LI10, THI10, MUR12, AHM16, SUN16, MOW16]; •studiul microdurității[LI10, THI10, MUR12, AHM16, SON14, SUN16, MOW16, BOR16, BOR16a]; •proprietățile fizico-mecanice [LI10, ZAE10, MUR12, XUB13, SON14, AHM16, SUN16, MOW16, ALI18];
Îmbunătățirea procesului SLM prin monitorizare continua	<ul style="list-style-type: none"> •monitorizarea prin inspecție vizuala sau camera termică [DOU15]; •monitorizarea temperaturii cu pirometru [YAD10];

Fig. 1.2. Direcții de cercetare la nivel internațional în domeniul SLM

În procesul SLM sunt folosite multe metale și aliaje, iar numărul lor crește în fiecare zi. Printre cele mai des întâlnite în literatura de specialitate se pot aminti: oțel inox, aluminu, oțel de scule, titan, materiale ceramice și compozite.

Pentru a se putea reduce consumul de material și timp alocat fabricării de piese noi sau piese realizate din materiale noi, s-a trecut la simularea procesului de topire selectivă cu laserul prin metodele numerice. În această direcție s-au identificat în literatura de specialitate două abordări, una ce folosește softuri generalizate dezvoltate de companii mari precum ANSYS sau CFD [ZAE10], dar care nu sunt dedicate acestui tip de analiză, și, o altă categorie, a softurilor personalizate, dezvoltate și îmbunătățite pentru fiecare mașină în parte [YAD10, PAP17]. Simularea cu analiză numerică se împarte la rândul ei în două și anume: simularea fabricării unei piese pentru a se genera parametrii de lucru și simularea tensiunilor ce apar într-o piesă pentru a se putea realiza o mai bună poziționare în timpul fabricării.

Următorul pas în dezvoltarea procedurii SLM constă în utilizarea unei game cât mai mari de materiale. La acest moment se folosesc în jur de o sută de tipuri de pulberi, însă acestea sunt în continuă creștere, printre cele mai importante, care au și o pondere mai mare în literatura de specialitate sunt: tungsten [ZHA10], aur [KHA10], titan [THI10], nichel [ZHA10], ceramici [HAG10], compozite [ZHA10, LI10b] bicompatibile [LEO15a, BOR16, COS16, BOR16a, BOR17, MAN18, TUR18].

O altă direcție a cercetării din domeniul SLM este *studiul microstructurii și a proprietăților fizico-mecanice* ale pieselor obținute în urma procesului de topire selectivă cu laser. În această direcție de cercetare sunt:

- studiul microstructurii interne a piesei [LI10, LI10b, THI10, MUR12, SUN16];
- studiul microdureții [THI10, MUR12, SUN16, BOR16, BOR16a];
- proprietățile fizico-mecanice [LI10, ZAE10, MUR12, HAN15, AHM16, MOW16, SUN16, ALI18].

Îmbunătățirea procesului SLM se poate realiza, în acest moment, și prin monitorizarea continuă a fabricației unei piese. Această monitorizare poate să fie monitorizarea prin inspecție vizuală (cu ajutorul unor camere video de înaltă rezoluție, sau monitorizarea temperaturii cu pirometru) [LOT11].

1.7. Concluzii

În urma analizei stadiului actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive se pot desprinde următoarele concluzii:

- În ceea ce privește fabricația aditivă a pieselor fabricate din pulberi metalice procesul nu este încă unul pe deplin optimizat. Piese obținute au o dependență directă de strategiile de fabricație utilizate. Până în prezent, nu s-a găsit o strategie de fabricație care să ofere rezultate optime pentru toate configurațiile de piese și materiale posibile.
- Fiecare material și aliaj are alte caracteristici și, pentru a putea fi folosit la scară industrială, trebuie întreprinse cercetări în vederea definirii parametrilor de lucru și proprietățile fizico-chimice și mecanice aferente fiecărei strategii de fabricație;
- De regulă, o strategie de fabricație generează un alt set de proprietăți fizico-chimice și mecanice, fiind necesar a se întreprinde cercetări pentru a se realiza corelații între diferitele strategii de fabricație și proprietățile obținute;
- Timpul de fabricație utilizând procedee aditive (inclusiv SLM) nu este foarte scurt și acesta crește proporțional cu complexitatea și dimensiunile pieselor fabricate, de aceea trebuie găsite metode de micșorare a timpului de fabricație.

În urma analizei stadiului actual, se poate evidenția faptul că domeniul fabricației aditive este unul de vârf, care generează mult interes atât în rândul institutelor de cercetare și universități, cât și în rândul companiilor industriale, fiind lansate pe piață, în fiecare an, metode și strategii de fabricație.

Prezenta teză de doctorat își propune să realizeze cercetări în ceea ce privește influența unor strategii de fabricație asupra microdurității și a microstructurii interne, dar și asupra rezultatului final (piesa poate sau nu poate să fie realizată folosind strategia de fabricație aleasă)

Capitolul 2. Obiectivele tezei de doctorat

În urma studierii în literatura de specialitate a cercetărilor întreprinse în domeniul fabricației aditive utilizând procesul de topire selectivă cu laserul, au rezultat următoarele direcții de cercetare care ar putea fi abordate în acest domeniu:

- îmbunătățirea procesului de fabricație pentru a se putea obține piese cu proprietăți mai bune, cu mărirea productivității și reducerea costurilor de fabricație;
- modelarea matematică a procesului de fabricație aditivă prin topire selectivă cu laserul;
- optimizarea parametrilor de lucru pentru materiale și aliaje noi;
- corelarea parametrilor de fabricație cu proprietățile fizico-mecanice ale pieselor fabricate.

Având în vedere stadiul actual, concluziile desprinse în urma analizei acestuia și principalele direcții de cercetare care ar putea fi urmate, poate fi stabilit obiectivul principal al investigațiilor științifice. Acesta constă în:

Desfășurarea unor cercetări privind procesul de fabricare a pieselor obținute din oțel inoxidabil (ANSI 316 L) prin procedeul de topire selectivă cu laserul, utilizând strategii diferite de fabricație, una ce folosește un strat de pulbere cu grosimea de 30 [μm] și alta ce folosește un strat de grosime 50 [μm] cu studierea influenței mărimii stratului asupra microdurității și microstructurii interne a piesei finale.

În vederea îndeplinirii obiectivului principal, au fost stabilite, pentru piese fabricate din pulbere din oțel inoxidabil ANSI 316L, următoarele obiective derivate:

- *Desfășurarea unor cercetări privind influența poziționării pieselor de diferite configurații, pe masa de lucru și a grosimii stratului de fabricație, asupra microdurității.*
- *Desfășurarea unor cercetări privind influența poziționării pieselor de diferite configurații, pe masa de lucru și a grosimii stratului de fabricație, asupra microstructurii.*
- *Elaborarea unui studiu de caz referitor la refabricarea unei piese deteriorate din componența unui ansamblu, pentru care nu există documentație tehnică.*
- *Elaborarea unui studiu de caz referitor la analiza influenței poziționării piesei pe masa de lucru asupra timpului de fabricație, în cazul fabricării unui molar mandibular și a unui premolar.*

Capitolul 3. Microduritatea pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul

3.1. Metode de determinare a durității

3.1.2. Metoda Vickers de determinare a durității

Penetratorul, pentru metoda Vickers de determinare a durității, este o prismă cu 4 fețe și baza formată dintr-un pătrat. Unghiul dintre două fețe are o valoare specifică de 136° (figura 3.3). Datorită formei pe care o are penetratorul, la această metodă este valabilă legea rezistenței proporționale, adică, forța de testare și suprafața rezultată în urma indentării sunt proporționale [HER11, ISO97].

Duritatea Vickers este direct proporțională cu coeficientul obținut prin împărțirea forței de testare F , și aria pantei suprafeței indentate rămasă după penetrare A , care este calculată folosind valoarea medie d , obținută din cele două diagonale d_1 și d_2 (figura 3.4). Acest lucru va fi adevărat atâta timp cât se presupune că urma rămasă după indentare este o reprezentare geometrică adevărată a penetratorului [HER11].

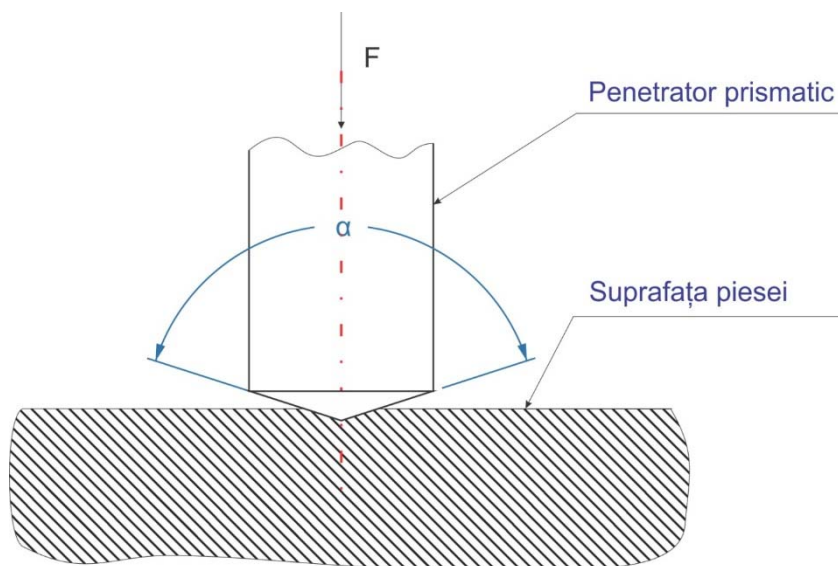


Fig. 3.1. Principiul metodei de determinare a durității Vickers [ISO97]

Relația, în acest caz, este următoarea:

$$HV = C \times \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

în care:

- HV - duritatea Vickers;
- C - o constantă în funcție de accelerația gravitațională;
- F - forța aplicată pentru indentare;
- A - aria suprafeței indentării după îndepărtarea penetratorului;

$$C = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} \approx 0,102 \quad (3.4)$$

$$A = \frac{d^2}{2 \times \sin \frac{136^\circ}{2}} = \frac{d^2}{1.854} \quad (3.5)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.6)$$

$$HV = 0,102 \times \frac{F}{\frac{d^2}{1,854}} = 0,102 \times 1,854 \times \frac{F}{d^2} \approx 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (3.7)$$

În relația 3.7 semnificația simbolurilor este:

- d - media valorilor d_1 și d_2 ;
- d_1, d_2 - măsura diagonalei identării lăsate pe piesă de către penetrator după aplicarea forței F;
- F - forța folosită pentru indentare;
- HV - duritatea Vickers.

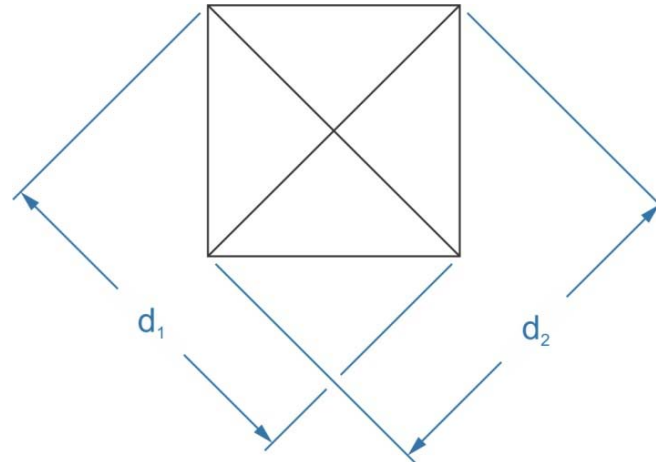
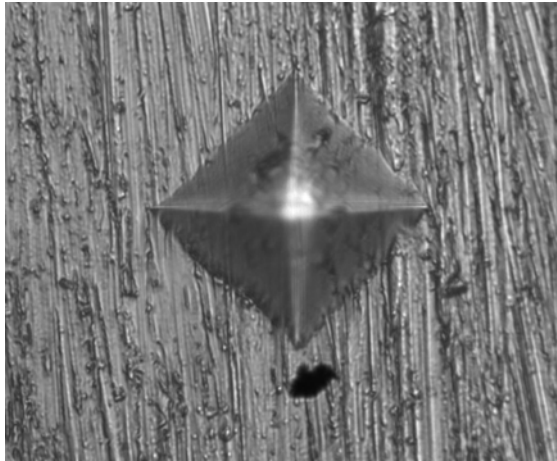


Fig. 3.2. Principiul de măsurare pentru metoda Vickers de determinare a durității [ISO97]



Fig. 3.3. Aparat de testare a microdurității FM 700

3.1.3. Microduratea Vickers

În cercetarea desfășurată în cadrul prezentei teze de doctorat, s-a folosit metoda statică Vickers de determinare a microduratei pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul. Pentru această metodă s-a folosit aparatul pentru determinarea microduratei Vickers FM 700 (figura 3.5) ce poate măsura duritatea Vickers și Knoop pe suprafețe micrometrice de pe piese metalice și nemetalice, folosind forțe între 9.807×10^{-3} și 9.807 N .

Măsurarea microduratei Vickers este un proces ce folosește o mașină calibrată pentru a forța un penetrator prismatic din diamant în suprafața materialului ce trebuie evaluat (figura 3.5). Forțele utilizate de acest dispozitiv sunt între 9.807×10^{-3} și 9.807 N (tabelul 3.1). După aplicarea forțelor se măsoară diagonalele urmei lăstate de penetrator, folosind un microscop. Pentru a se efectua măsurătoarea se presupune că urma indentației nu suferă o revenire elastică după îndepărtarea forței.

Tabelul 3.1. Parametrii tehnici ai echipamentului Micro hardness tester FM 700

Forța aplicată	98,07 – 9807 mN 10 – 1000 gf
Penetrator folosit	de tip Vickers diamantat (HV de tip Knoop diamantat (HK)
Microscop încorporat	Factorul de multiplicare pentru măsurători x 400 (lentilă 40 x ocular 10) dimensiunea maximă ce poate fi măsurată 200 μm dimensiunea minimă ce poate fi măsurată (o unitate) 0.1 μm
Recalcularea valorii durității	conform SEA (J-417b), ASTM E-140 și JIS
Precizia	conform JIS B-7734 și ASTM E-384

3.2. Fabricarea pieselor utilizând procedeul SLM

În prezenta lucrare, pentru determinarea microduratei Vickers, au fost fabricate, utilizând procedeul de topire selectivă cu laserul, două seturi de piese, unul folosind un strat de fabricație de 30 [μm] și celălalt set folosind un strat de fabricație de 50 [μm].

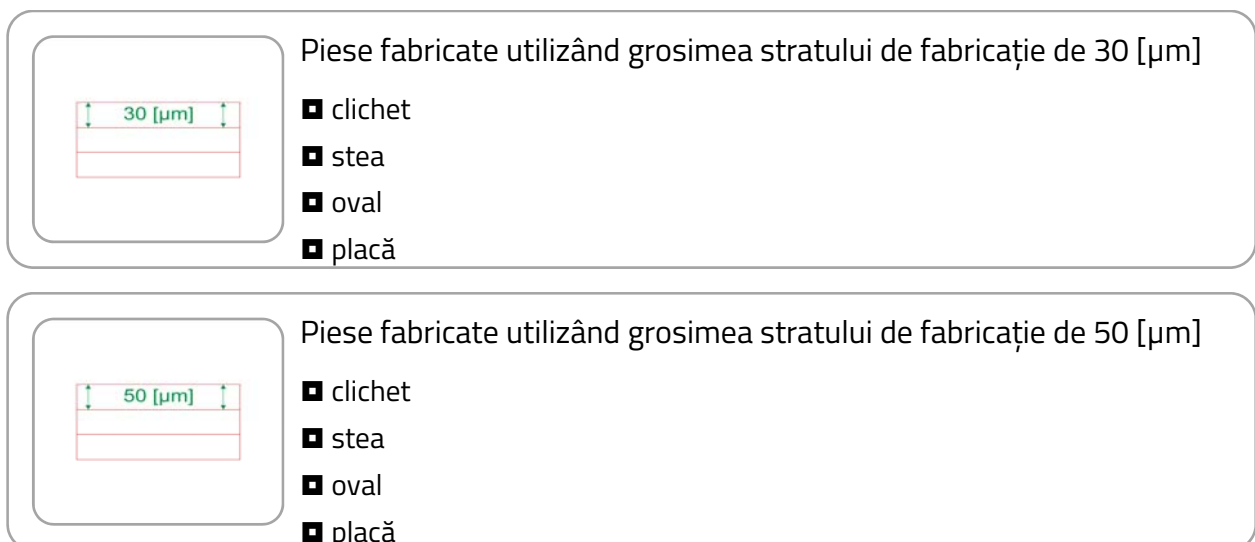


Fig. 3.4. Piese fabricate utilizând procedeul SLM

Piese fabricate, utilizând cele două strategii de fabricație, au fost modelate în Pro/ENGINEER Wildfire și apoi exportate ca fișiere STL pentru a fi importate în software-ul corespunzător mașinii de fabricație aditivă SLM250HL.

Pentru a se putea determina microduritatea au fost fabricate câte 4 piese, de configurații diferite, utilizând fiecare strategie (figura 3.6): un clichet, o piesă sub formă de stea, o piesă cu formă ovală și o placă dreptunghiulară. Aceste piese au fost fabricate utilizându-se odată o grosime a stratului de fabricație de 30 [μm], după care au fost fabricate utilizând o grosime a stratului de fabricație de 50 [μm].

Tabelul 3.2. Codificările pieselor fabricate prin procedeul SLM cu strat de 30 și strat de 50 [μm]

Numele piesei 30 [μm]	Codificarea piesei 30 [μm]	Numele piesei 50 [μm]	Codificarea piesei 50 [μm]
Clichet (figura 3.7)	(C 30 UM)	Placa (fig. 3.10)	(P 50 UM)
Stea (figura 3.8)	(S 30 UM)	Stea (fig. 3.11)	(S 50 UM)
Oval (figura 3.9)	(O 30 UM)	Oval (fig. 3.11)	(O 50 UM)

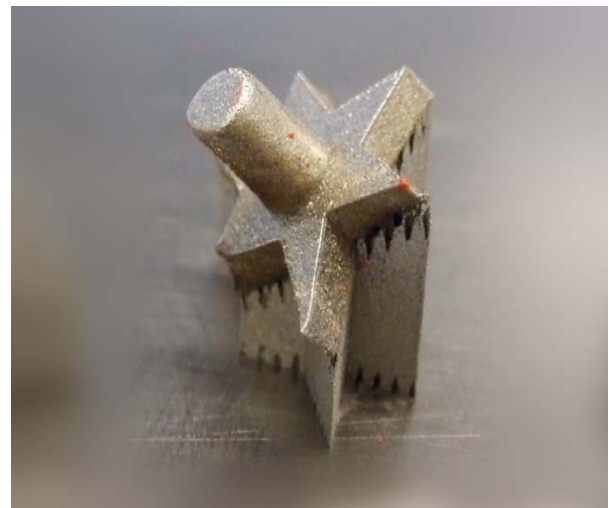
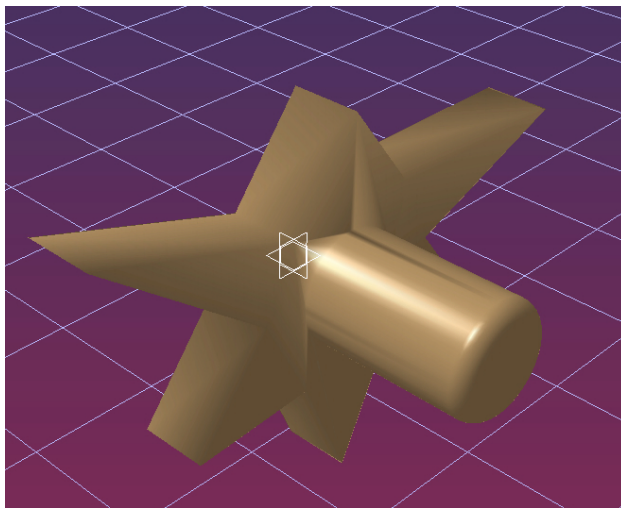


Fig. 3.5. Stea (S 30 UM) fabricată prin procedeul SLM cu un strat 30 [μm] [BUI15]

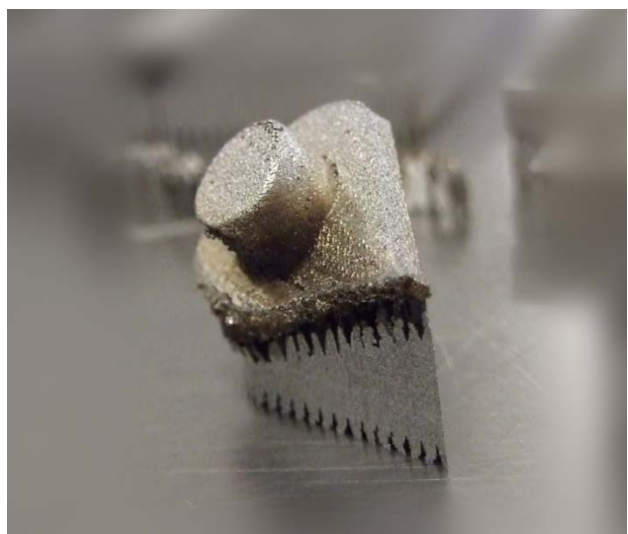
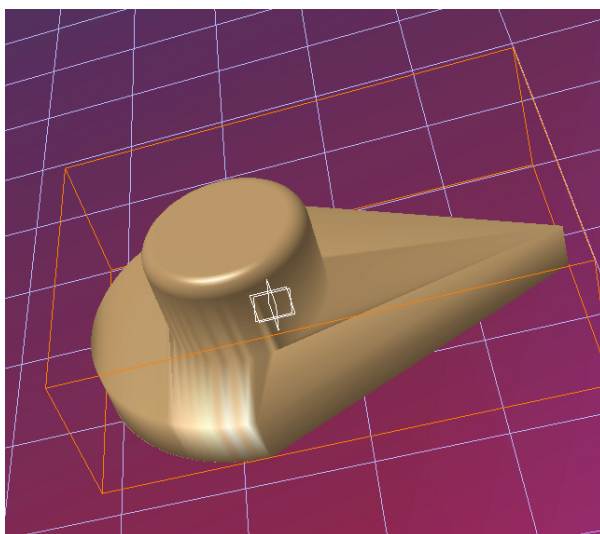


Fig. 3.6 Oval (O 30 UM) fabricat prin procedeul SLM cu un strat 30 [μm] [BUI15]

Folosindu-se parametrii de lucru din tabelul 3.3. au fost fabricate, pentru acest studiu, piesele din tabelul 3.2: clichet - C 30 UM (figura 3.7), stea - S 30 UM (figura 3.8) și oval - O 30 UM (figura 3.9) pentru grosimea stratului de fabricație de 30 [μm] și placă - P 50 UM (figura 3.10), stea - S 50 UM (figura 3.11) și oval - O 50 UM (figura 3.11) pentru grosimea stratului de fabricație de 50 [μm].

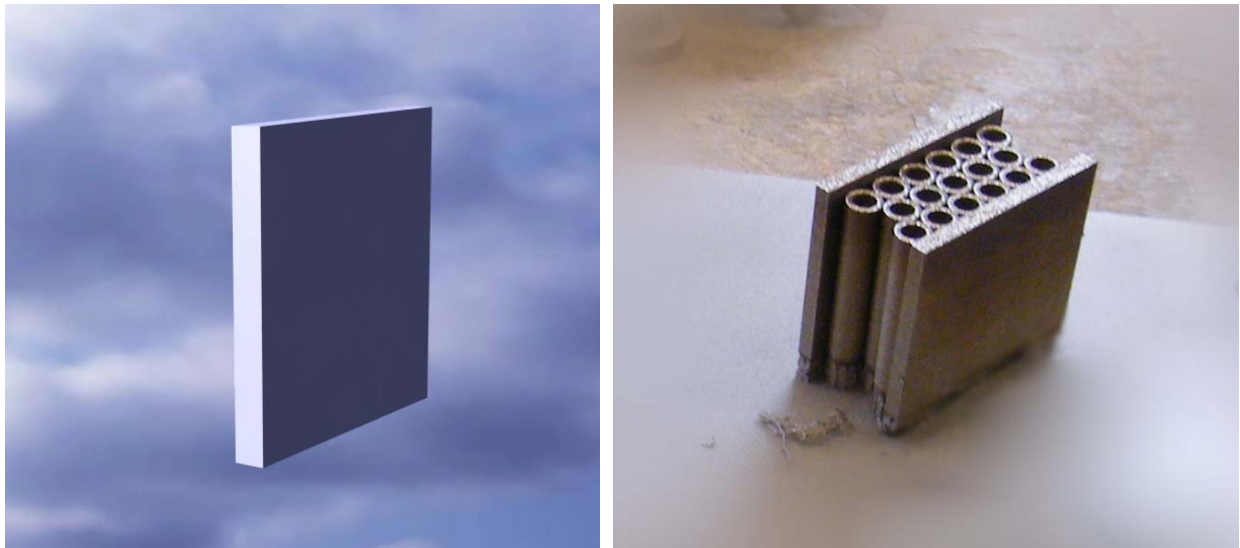


Fig. 3.7. Placă (P 50 UM) fabricată prin procedeul SLM cu un strat 50 [μm] [BUI15]

Tabelul 3.3. Parametrii de lucru pentru piesele cu strat de fabricație de 30 și 50 [μm] [BUI15].

Parametrului	Strat de 30 [μm]	Strat de 50 [μm]
Puterea Laserului	100 [W]	166 [W]
Viteza de scanare a laserului	150 [mm/s]	150 [mm/s]
Distanța dintre două trasee diferite ale laserului	0.175 [mm]	0.175 [mm]
Grosimea stratului de fabricație	0.03 [mm]	0.05 [mm]
Dimensiunea particulelor din pulbere	20-40 [μm]	
Densitatea de energie calculată	126,98 [J]	126.47 [J]



Fig. 3.8. Oval - O 50 UM – stânga – și Stea - S 50 UM – dreapta – fabricate prin procedeul SLM cu un strat de 50 [μm]

3.3. Postprocesarea pieselor pentru măsurarea microdurității.

În cadrul cercetărilor desfășurate, s-au măsurat microduritățile pentru fiecare piesă în două cazuri diferite [BUI15b]:

- forța de măsurare a microdurității prin metoda Vickers este aplicată perpendicular pe straturile de fabricație (FP);
- forța de măsurare a microdurității prin metoda Vickers este aplicată paralel cu starturile de fabricație (FII).

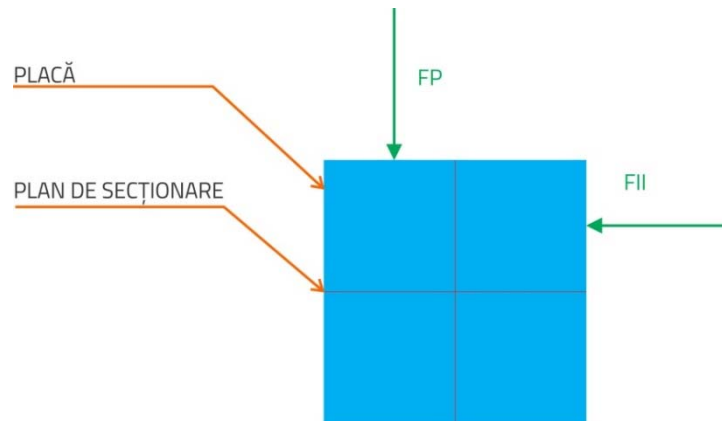


Fig. 3.9. Planul de secționare și forțele aplicate pentru placa fabricată cu straturile paralele cu masa de lucru (P 50 UM)

Pentru a se putea efectua măsurătorile în ambele scenarii, piesele au fost secționare perpendicular pe straturile de fabricație și apoi paralel cu acestea.

Întrucât forma și complexitatea pieselor fabricate este diferită, fiecare dintre acestea a fost fabricată utilizând o anumită poziționare relativ la masa mașinii. Datorită acestei poziționări există 2 cazuri diferite în care se efectuează tăierile și se aplică forțele [BUI15b].

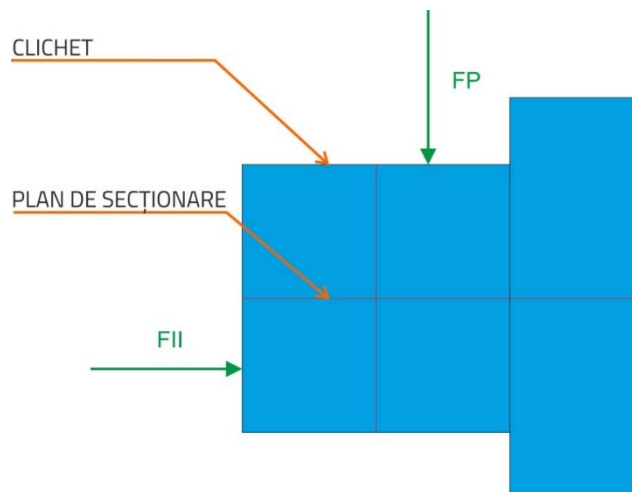


Fig. 3.10. Planurile de secționare și forțele aplicate pentru piesele de tip clichet fabricat cu straturile paralele cu masa de fabricație (C 30 UM)

În primul caz, starturile de fabricare a pieselor au fost paralele cu masa de lucru a mașinii SLM. Acest caz este specific pieselor clichet - C 30 UM) și placă - P 50 UM. Pentru aceste două piese, tăieturile și forțele au fost aplicate conform celor prezentate în figurile 3.12 și 3.13.

Pentru cel de al doilea caz, la piesele de tip stea și oval, pentru amândouă strategiile de fabricație (grosimea stratului de 30 [μm] cât și pentru cel de 50 [μm]), întrucât piesele au fost așezate la un unghi de 45° în raport cu masa de fabricație, se aplică tăieturile și forțele conform figurii 3.14.

Piesele sunt tăiate conform celor prezentate în figurile 3.12, 3.13 și 3.14 deoarece se studiază microduritatea Vickers internă a piesei. Tăierea s-a realizat utilizând un disc abraziv răcit cu apă. S-a folosit această metodă deoarece păstrează nemodificată structura internă a pieselor fabricate prin procedeul SLM (figura 3.15).

După procesul de tăiere urmează un proces de șlefuire a suprafeței tăiate. Această operație se realizează succesiv prin utilizare de hârtie abrazivă de diferite granulații (1500, 2000 și 2500). Necesitatea acestei operații este dată de nevoia înlăturării oricărei urme lăstate de procesul de tăiere, dar și de necesitatea obținerii unei suprafețe cu o rugozitate cât mai mică.

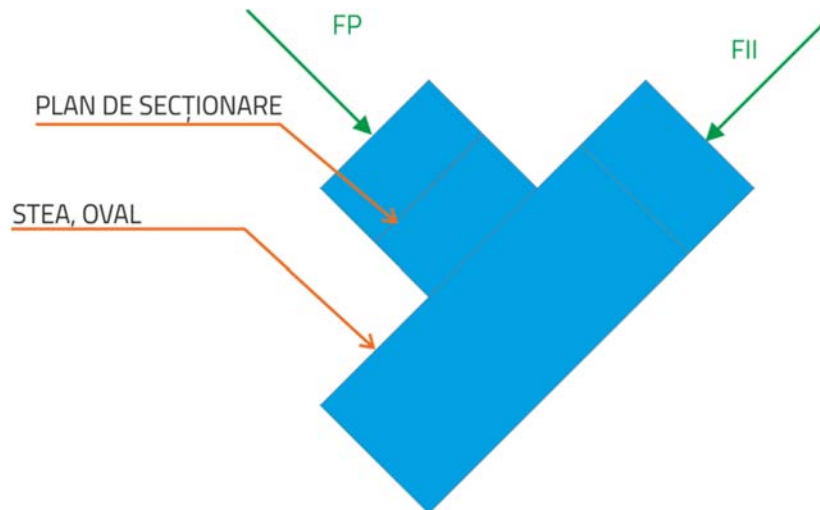


Fig. 3.11. Planul de secționare și forțele aplicate pentru piesele de tip stea și oval fabricate cu straturile așezate la un unghi de 45° în raport cu masa de fabricație (S 30 UM) (S 50 UM) (O 30 UM) și (O 50 UM)

Întrucât suprafața de analizat trebuie să fie finisată în așa fel încât diagonalele lăstate de penetratorul prismatic să poată fi bine identificate și măsurate cu o precizie de $\pm 5\%$ sau cu o jumătate de micron, orice urmă lăsată pe suprafața ce trebuie măsurată poate influența valoarea durității Vickers [ROY10].

3.4. Măsurarea microdurității Vickers

Microduritatea Vickers internă a pieselor fabricate prin procedeul SLM s-a determinat utilizând aparatul de măsurare al microdurității FM 700, aparat ce are capacitatea să măsoare duritatea Vickers HV pe suprafețe micrometrice (la nivelul grăunțurilor) pentru piese metalice și nemetalice, utilizând forțe între 9.807×10^{-3} și 9.807 N [BUI15b].

Pentru determinarea microdurității utilizând acest aparat, centrul de penetrare al prisme ar trebui situat la o distanță de cel puțin 2.5 ori diagonala prisme, față de măsurătoarea precedentă. Acest lucru este necesar pentru a se putea ocoli influența zonei afectate de penetrarea prisme asupra determinării

microdurității. De asemenea, zonele de măsurare ar trebui astfel alese încât acestea să nu prezinte defecte, zgârieturi sau incluziuni, deoarece acestea vor influența valoarea măsurată a microdurității.

Tabelul 3.4. Microduritatea pieselor fabricate cu un start de 30 [μm].

Nr. Crt.	C 30 UM FP [HV]	C 30 UM FII [HV]	S 30 UM FII [HV]	S 30 UM FP [HV]	O 30 UM FP [HV]	O 30 UM FII [HV]
1	136.60	233.60	235.5	238.00	216.80	225.00
2	188.00	223.20	237.8	217.00	217.60	230.40
3	208.70	215.60	224.5	216.50	211.30	228.80
4	209.90	214.50	211	227.50	224.50	215.00
5	205.80	205.40	212	238.10	219.30	218.10
6	200.20	227.80	204.7	218.60	209.90	230.50
7	212.90	216.00	213.6	223.30	229.40	218.10
8	219.30	100.50	219.2	217.50	228.70	221.50
9	187.40	204.30	216	231.90	232.90	231.40
10	210.30	201.20	215	216.00	235.70	205.30
11	205.40	221.20	211.8	215.30	214.40	208.80
12	206.30	214.20	203	220.50	206.10	198.50
13	214.60	205.80	204.6	248.70	219.30	209.20
14	191.20	204.40	206.4	224.00	232.20	224.70
15	191.60	216.10	199.4	216.30	230.20	219.90
16	193.90	226.30	203.2	217.40	229.50	227.40
17	198.00	209.20	209.6	199.00	216.30	243.00
18	197.60	211.40	207.2	201.90	232.60	212.40
19	196.80	234.30	223.6	228.10	223.70	218.10
20	196.50	217.10	227.1	225.00	231.90	213.40
21	179.30	184.00	208.1	239.40	238.90	206.30
22	199.10	207.40	110.8	204.60	216.00	215.60
23	173.70	232.90	209.7	207.50	228.80	205.30
24	192.40	192.90	186.6	216.20	240.60	209.70
25	192.10	228.90	213.5	215.30	230.30	230.20
26	196.40	215.10	212.8	182.80	216.20	216.90
27	195.80	219.70	214.1	217.50	232.80	230.70
28	189.70	229.10	222.4	203.00	222.10	211.50
29	205.50	232.60	217.2	218.90	228.80	248.50
30	209.90	221.50	215.2	214.00	240.10	215.50
31	206.20	220.80	232.3	225.20	234.90	221.50
32	203.10	232.10	225.3	227.60	228.30	223.10
33	200.50	227.40	214.4	118.50	235.60	220.90
34	195.80	206.80	218.8	225.60	230.60	215.70
35	202.60	205.10	231.1	217.10	236.70	213.60
36	220.00	215.40	215.4	207.60	237.30	209.40
37	220.70	217.20	218	214.30	221.10	219.20
38	204.30	212.10	216.5	220.10	222.90	208.50
39	204.40	231.30	226.4	214.40	243.20	196.90
40	211.30	229.40	222	220.30	214.70	206.80
41	211.30	207.50	210.6	221.50	233.40	233.20
42	230.30	219.10	227.1	238.60	250.80	201.80
43	185.90	208.50	220.2	224.50	225.80	190.60
44	230.60	223.20	205	219.30	228.90	232.10
45	205.70	199.40	204	220.60	219.80	205.00
46	212.20	226.40	215.6	224.90	187.10	218.30
47	204.00	208.00	225.1	221.70	244.10	215.90
48	207.00	213.20	225.3	214.30	215.70	198.20
49	215.80	239.70	210.1	227.30	216.20	206.90
50	208.80	226.00	210.8	211.70	173.20	209.20

Tabelul 3.5. Microdunitatea pieselor fabricate cu un strat de 50 [μm]

Nr. Crt.	P 50 UM FP [HV]	P 50 UM FII [HV]	S 50 UM FP [HV]	S 50 UM FII [HV]	O 50 UM FP [HV]	O 50 UM FII [HV]
1	291.40	222.70	215.40	216.00	224.50	217.20
2	233.00	199.20	221.70	218.00	207.00	227.60
3	221.60	209.20	202.70	214.00	204.30	227.00
4	211.30	221.00	216.30	205.00	220.60	214.70
5	200.50	211.00	222.00	202.00	204.40	234.70
6	211.80	195.10	224.70	204.00	199.70	230.30
7	211.50	210.30	229.30	195.00	232.10	232.20
8	208.40	210.10	216.50	203.00	215.10	222.80
9	211.50	214.60	219.30	196.00	212.20	222.70
10	231.90	226.80	223.40	183.00	170.70	230.00
11	215.80	225.20	227.10	201.00	209.80	216.10
12	227.80	234.50	234.80	215.00	242.00	211.50
13	249.00	202.50	234.80	214.00	231.20	231.70
14	233.40	206.10	211.60	216.00	222.30	242.70
15	220.60	207.00	217.80	219.00	226.70	212.80
16	230.00	208.80	226.00	194.00	221.50	225.10
17	221.10	224.10	228.00	195.00	184.20	203.90
18	257.80	226.20	222.10	202.00	242.00	225.60
19	207.00	230.40	222.40	208.00	235.10	201.20
20	217.50	212.40	221.80	221.00	249.10	235.20
21	218.40	226.60	209.10	205.00	224.70	215.10
22	204.90	221.90	222.60	201.00	224.00	212.40
23	209.70	214.30	219.90	206.00	233.90	211.10
24	215.70	206.60	223.20	204.00	215.20	218.80
25	188.60	207.70	224.60	214.00	231.80	210.50
26	215.70	206.90	224.20	185.00	214.80	198.20
27	218.20	217.70	215.50	219.00	225.40	214.50
28	172.60	213.00	221.70	212.00	200.30	210.80
29	216.60	217.90	212.80	209.00	220.20	188.90
30	215.90	219.10	209.60	151.00	233.90	225.60
31	212.20	211.40	243.90	200.00	204.30	221.10
32	209.40	211.50	230.90	213.00	218.80	227.60
33	215.30	215.90	231.80	205.00	214.10	226.20
34	205.10	215.50	239.30	196.00	223.50	214.10
35	198.50	240.40	231.70	207.00	216.00	209.50
36	205.20	237.10	241.40	213.00	232.90	231.40
37	204.10	224.60	218.00	185.00	239.70	235.90
38	210.90	219.90	237.10	213.00	228.50	198.90
39	202.90	225.60	220.00	172.00	246.70	223.10
40	214.30	228.30	222.00	204.00	238.90	223.30
41	208.90	227.30	224.80	190.00	240.10	218.80
42	199.00	215.50	233.00	197.00	227.40	224.90
43	208.20	215.00	220.30	192.00	215.00	222.30
44	188.90	219.10	224.00	207.00	228.50	235.60
45	191.70	221.00	225.80	201.00	215.10	229.30
46	200.70	219.60	229.70	185.00	222.00	207.70
47	215.40	201.30	227.80	193.00	222.50	218.70
48	201.30	211.00	238.80	215.00	212.70	198.20
49	197.40	210.60	233.00	209.00	229.80	234.80
50	200.60	214.00	228.10	193.00	225.50	214.60

Pe suprafețele pieselor tăiate și finisate s-au aplicat forțele conform figurilor 3.12, 3.13 și 3.14. Pentru măsurarea microdunității forța a fost aplicată pentru un timp de 15 [s], cu o valoare de, $F=500$ [gf] (4.903325 [N]). Pentru fiecare piesă au fost efectuate 100 de măsurători, 50 măsurători cu forța

aplicată pe suprafața paralelă cu straturile de fabricație și 50 măsurători aplicate pe suprafața perpendiculară pe straturile de fabricație. În urma măsurătorilor se calculează valoarea medie a diagonalei urmei lăstate de penetratorul prismatic utilizând mărimea diagonalelor indentației (figura 3.4). Cu valoarea medie a diagonalei și cu valoarea forței aplicate, software-ul aferent aparatului calculează folosind ecuația (3.7) microduritatea Vickers. În urma acestor măsurători au rezultat datele din tabelul 3.4 pentru piesele fabricate cu start de 30 [μm] și datele din tabelul 3.5 pentru piesele fabricate cu start de 50 [μm]. În urma măsurătorilor, au rezultat două eșantioane diferite de date unul pentru forțele aplicate perpendicular (notate cu numele piesei la care se va adăuga FP) și unul pentru forțele aplicate paralel (notate cu numele piesei la care se va adăuga FII) [BU115b].

3.5. Interpretarea rezultatelor.

Pentru interpretarea rezultatelor și studiul comparativ al microdurității pieselor fabricate cu un strat de pulbere de grosime de 30 [μm] și al pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 50 [μm] se folosește metodologia stabilită în teză.

3.6. Analiza valorilor aberante. Metoda rangurilor

La fel ca în orice eșantion de date și în cazul valorilor obținute pentru microduritatea Vickers se pot identifica valori care pot fi aberante (foarte mari sau foarte mici). De asemenea, în graficul probabilităților pot exista puncte care sunt plasate foarte jos sau foarte sus față de linia de interpolare. Din aceste motive trebuie realizate operații de validare a datelor în urma cărora se selectează datele ce rămân în analiză și cele care sunt eliminate ca neaparținând populației din care provin datele. Acest lucru se realizează prin analiza datelor ce nu aparțin populației sau analiza valorilor aberante [KEC02].

Printre metodele de analiză a valorilor aberante se numără [KEC02]:

- testul pentru analiza valorilor aberante Natrella-Dixon;
- testul pentru analiza valorilor aberante Grubbs;
- și testul pentru analiza valorilor aberante bazat pe metoda rangurilor sau *Rank Limits Method* propusă de Dimitri Kececioglu și Feng-Bin Sun.

În cadrul cercetărilor s-a ales ca metodă de analiză a valorilor aberante metoda rangurilor propusă de Dimitri Kececioglu. A fost luată această decizie, deoarece metoda de analiză poate detecta valori aberante din orice eșantion (distribuția statistică nu trebuie să fie una normală) și, în același timp, poate identifica valori aberante care se găsesc și în interiorul eșantionului de date, nu doar la capetele acestuia.

3.7. Caracterizarea statistică a eșantioanelor de date

Datele obținute au fost supuse analizei statistice în care s-au calculat parametrii statistici. De asemenea, s-a realizat și analiza valorilor aberante, pentru identificarea valorilor ce nu fac parte din eșantionul de date. Această analiză folosește metoda rangurilor limită, metodă ce poate identifica și valori aberante aflate în interiorul eșantionului de valori.

Analiza valorilor aberante este efectuată până când sunt eliminate toate valorile aberante. Valorile rămase în urma analizei valorilor aberante vor fi din nou supuse analizei statistice în care s-au calculat parametrii statistici.

Valorile aberante din eșantionul de date pot avea mai multe proveniențe după cum urmează:

- erori de poziționare generate de poziționarea pieselor pe masa dispozitivului;
- erori de măsurare generate de poziționarea indentatorului la limita dintre doi grăunți ai material;
- erori de măsurare generate de existența unor mici defecte (goluri) sau incluziuni în material;
- erori de măsurare generate în etapele de prelucrare ale mostrelor pentru analiză;
- erori umane de identificare corectă a amprenteii indentatorului.

După analiza statistică preliminară se realizează testul de normalitate Anderson-Darling (figura 3.17.). În urma acestei analize se poate observa că eșantionul de valori poate fi modelat de o distribuție normală. Acest lucru se poate vedea, și pe graficul de probabilitate, unde toate punctele sunt incluse în intervalul de încredere.

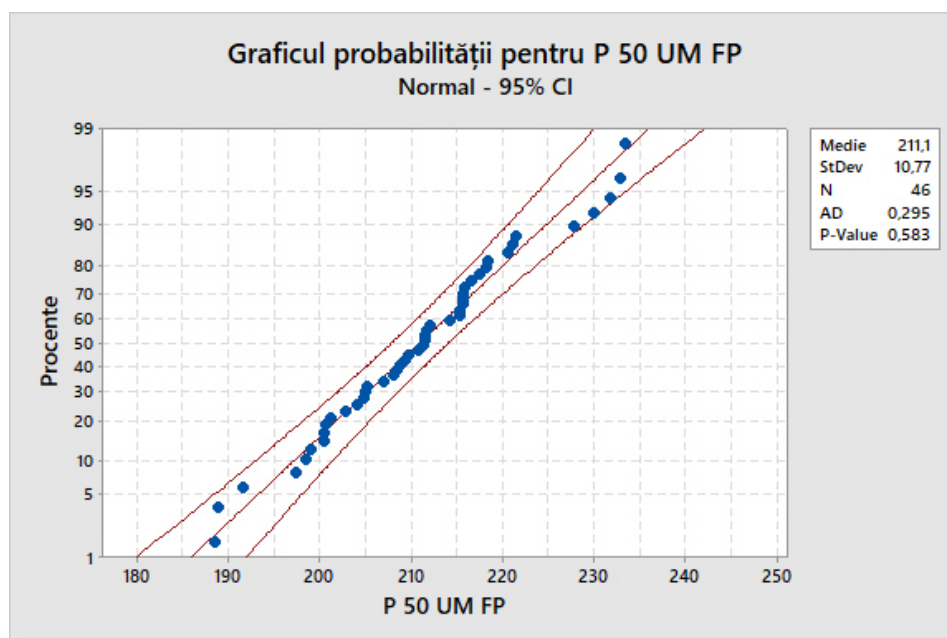


Fig. 3.12. Analiza de normalitate prin metoda Anderson-Darling pentru FP P 50 UM FP

Studiul histogramei relevă ca există o distribuție simetrică a valorilor de o parte și de cealaltă a valorii medii a eșantionului (figura 3.18). Această observație este întărită și de valorile calculate pentru parametrii statistici înclinarea = 0,10 și turtirea = -0,02 (tabelul 3.11.).

Pentru a studia simetria datelor s-a realizat și un grafic de tip boxplot. Din acesta reiese că datele sunt simetric distribuite de o parte și de cealaltă a valorii medianei, putându-se concluziona că este o distribuție normală simetrică.

Același tip de analiză statistică s-a efectuat și pentru restul eșantioanelor de date (P 50 UM FII, C 30 UM FP, C30 UM FII, O 50 UM FP, O 50 UM FII, O 30 UM FP, O 30 UM FII, S 50 UM FP, S 50 UM FII, S 30 UM FP, S 30 UM FII). În urma analizei s-a constatat că toate eșantioanele (după înlăturarea valorilor aberante) pot fi modelate de o distribuție normală.

Valorile obținute pentru fiecare eșantion, în urma eliminării valorilor aberante, sunt folosite pentru a realiza studiul comparativ al eșantioanelor, studiu în care se evidențiază influența pe care o au parametrii de fabricație asupra valorilor microdunității interne.

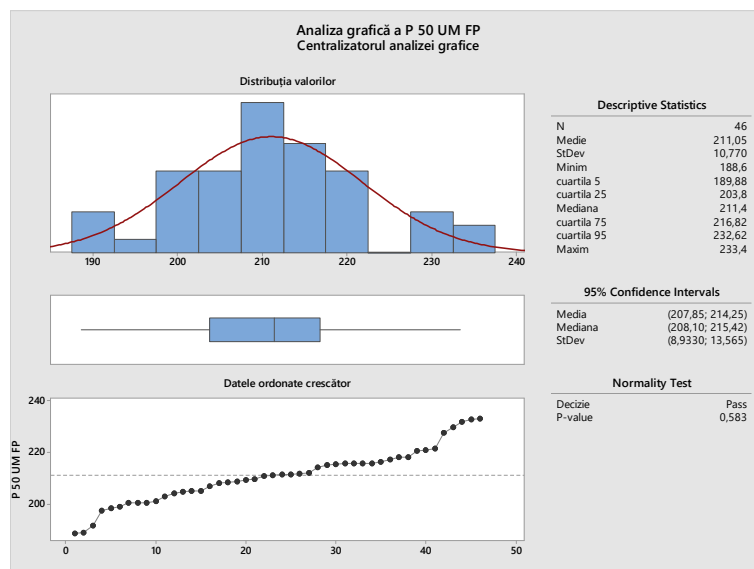


Fig. 3.13. Analiza grafică a setului de valori P 50 UM FP

3.8. Analiza statistică a microdunității interne

3.8.1. Analiza din punctul de vedere al mărimii stratului de fabricație, luându-se în considerare poziția de aplicare a forței de măsurare și poziționarea pe masa de fabricație.

Datele utilizate în cadrul studiului anterior, au fost grupate după grosimea stratului de fabricație (50 [μm] și 30 [μm]), poziția de aplicare a forței de măsurare a microdunității (perpendicular sau paralel cu stratul de fabricație) și poziția piesei în raport cu masa de fabricație (paralel sau la un unghi).

Pentru studiul influenței stratului de fabricație, a direcției de aplicare a forței de măsurare și a poziționării pe masa de fabricație, pentru toate variabilele s-au efectuat următorii pași:

- se cuplează câte două eșantioane de date de la două piese asemănătoare fabricate cu mărimea stratului de pulbere diferit:
 1. analiza pieselor de tip placa și clichet având starturile de fabricație poziționate paralel cu masa de fabricație și forța de măsurare aplicată paralel cu direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (P 50 UM FII ȘI C 30 UM FII);
 2. analiza pieselor de tip placa și a clichet având starturile de fabricație poziționate paralel cu masa de fabricație și forța de măsurare aplicată perpendicular pe direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (P 50 UM FP, C 30 UM FP);
 3. analiza pieselor de tip stea având straturile de fabricație poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație și forța de măsurare aplicată perpendicular pe direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (S 50 UM FP, S 30 UM FP);
 4. analiza pieselor de tip stea având starturile de fabricație poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație și forța de măsurare aplicată paralel cu direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (S 50 UM FII, S30 UM FII);

5. analiza pieselor de tip oval fabricate având starturile de fabricație poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație și forța de măsurare aplicată perpendicular pe direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (O 50 UM FP O 30 UM FP)
 6. analiza pieselor de tip oval având starturile de fabricație poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație și forța de măsurare aplicată paralel cu direcția stratului de fabricație, în funcție de grosimea stratului de fabricație (O 50 UM FII, O 30 UM FII).
- se cuplează pentru analiză, câte trei piese obținute prin fabricarea cu aceeași grosime a stratului de pulbere și aceeași direcție de aplicare a forței de măsurare, dar variind poziționarea față de masa de fabricație - analiza statistică a microdurității interne din punct de vedere al stratului de fabricație, luându-se în considerare poziția de aplicare a forței de măsurare și poziționarea, în funcție de masa de fabricație:
 1. analiza clichetului și a pieselor de tip stea și oval având forța de măsurare aplicată perpendicular pe direcția stratul de fabricație și grosimea stratului de fabricație de 30 μm, în funcție de poziționarea piesei (C 30 UM FP, S 30 UM FP, O 30 UM FP);
 2. analiza clichetului și a pieselor de tip stea și oval având forța de măsurare aplicată paralel cu direcția stratului de fabricație și grosimea stratului de fabricație de 30 μm, în funcție de poziționarea piesei (C 30 UM FII, S 30 UM FII ,O 30 UM FII);
 3. analiza plăcii și a pieselor de tip stea și oval având forța de măsurare aplicată perpendicular pe direcția stratul de fabricație și grosimea stratului de fabricație de 50 μm, în funcție de poziționarea piesei (P 50 UM FP, S50 UM FP , O 50 UM FP);
 analiza plăcii, și a pieselor de tip stea și oval având forța de măsurare aplicată paralel cu direcția stratului de fabricație și grosimea stratului de fabricație de 50 μm, în funcție de poziționarea piesei (P 50 UM FII, S50 UM FII, O 50 UM FII);

3.8.2. Analiza statistică a microdurității interne din punctul de vedere al mărimii stratului de fabricație, luându-se în considerare poziția de aplicare a forței de măsurare.

Datele utilizate în cadrul studiului anterior, au fost grupate după grosimea stratului de fabricație și poziția de aplicare a forței de măsurare a microdurității. În acest studiu nu se ia în considerare poziționarea piesei pe masa de fabricație, rămânând însă în analiză grosimea stratului de fabricație și direcția de aplicare a forței de măsurare.

În urma grupării datelor au rezultat patru seturi de date:

- 50 UM FP – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 50 [μm] și forța de măsurare a microdurității Vickers aplicată perpendicular pe stratul de fabricație;
- 50 UM FII – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 50 [μm] și forța de măsurare a microdurității Vickers aplicată paralel cu stratul de fabricație;
- 30 UM FP – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 30 [μm] și forța de măsurare a microdurității Vickers aplicată perpendicular pe stratul de fabricație;
- 30 UM FII – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 30 [μm] și forța de măsurare a microdurității Vickers aplicată paralel cu stratul de fabricație.

Cele patru eșantioane sunt analizate pentru a determina parametrii statistici dar și pentru a verifica dacă datele pot fi modelate de o distribuție normală. Aceste calcule au fost realizate în sistemul software de prelucrare statistică Minitab.

3.8.3. Analiza statistică a microdurității interne din punct de vedere al mărimii stratului de fabricație.

Valorile microdurității Vickers au fost grupate după criteriul mărime a stratului de fabricație. În acest studiu nu se ia lua în considerare poziționarea piesei în raport cu masa de fabricație sau direcția de aplicare a forței de măsurare, rămânând însă în analiză doar grosimea stratului de fabricație.

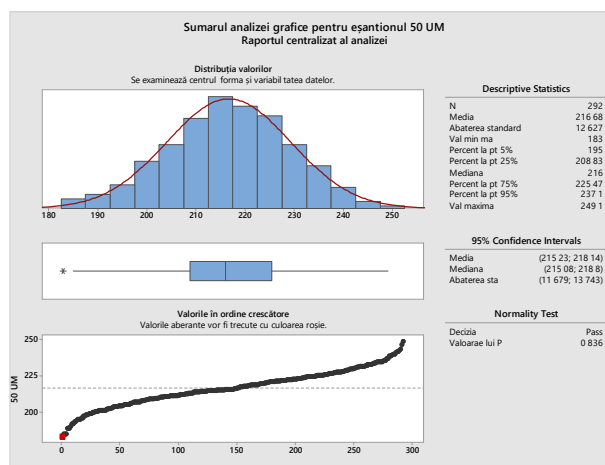


Fig. 3.14. Reprezentarea grafică a analizei statistice pentru variabila 50 UM

În urma grupării datelor au rezultat două seturi de date prezentate în Anexa 23 în ordine crescătoare:

- 50 UM – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 50 [μm];
- 30 UM P – pentru piesele realizate cu un strat de fabricație de 30 [μm].

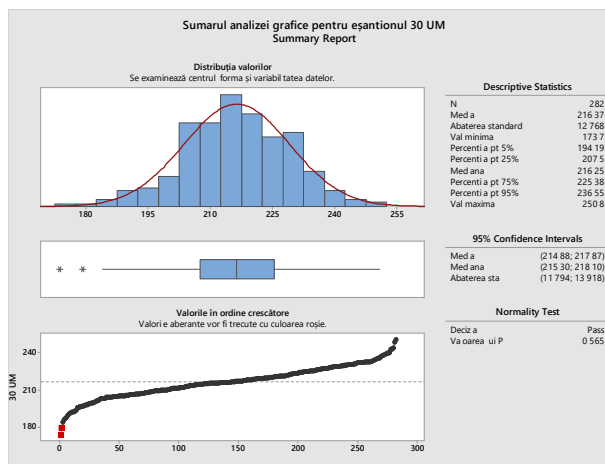


Fig. 3.15. Reprezentarea grafică a analizei statistice pentru variabila 30 UM FP

Cele două seturi de date sunt analizate atât pentru a determina parametrii statistici, cât și pentru a verifica dacă datele pot fi modelate de o distribuție normală. Aceste calcule au fost realizate în sistemul software Minitab.

3.9. Concluzii

3.9.1. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 30[μ m]

Pentru a putea prezenta concluzii legate de diferențele dintre mediile și dispersiile seturilor de date ale pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30 [μ m] s-a realizat o analiză ANOVA pentru fiecare indicator statistic, una pentru valoarea mediilor (figura 3.85) și altul pentru valoarea abaterii față de valoarea medie (figura 3.86). De asemenea, valorile mediei și ale abaterii standard se pot regăsi în tabelul 3.32.

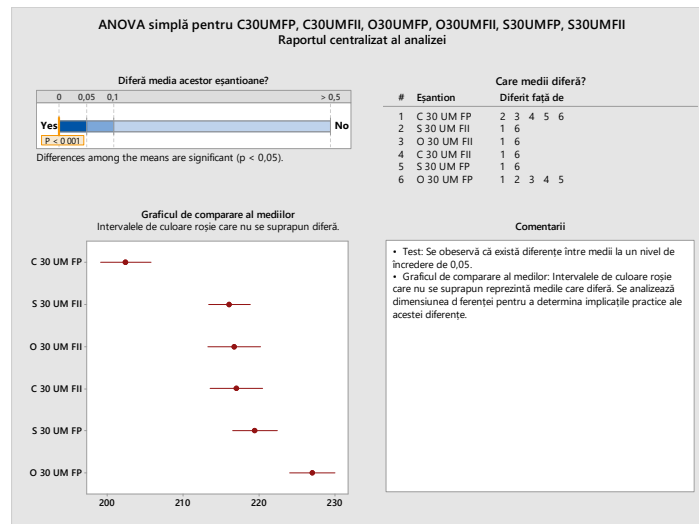


Fig. 3.16. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile medii ale eșantioanelor ce aparțin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μ m] diferă

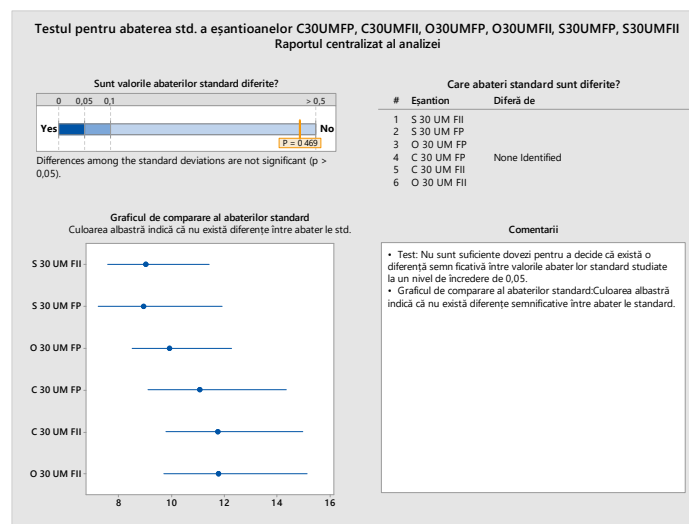


Fig. 3.17. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile abaterilor standard ale eșantioanelor ce aparțin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μ m] diferă.

Tabelul 3.6. Centralizator pentru valoarea mediei și a abaterii standard pentru eșantioanele pieselor fabricate cu un strat de fabricație de 30[μm]

Nr. crt.	Nume variabilă	Număr măsurători (eșantion) validate	Valoarea medie [HV]	Abaterii standard [HV]
1.	C 30 UM FP	48	202,47	11,081
2.	C 30 UM FII	49	217,03	11,750
3.	O 30 UM FP	48	227,02	9,9183
4.	O 30 UM FII	50	216,73	11,775
5.	S 30 UM FP	39	219,45	8,9428
6.	S 30 UM FII	48	216,09	9,0289

În urma analizei pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm] se pot evidenția următoarele aspecte:

- Când forța de măsurare a microdurității este aplicată paralel cu stratul de fabricație se observă că:
 - Atât piesele fabricate așezate paralel cu masa de fabricație cât și cele fabricate poziționate la un unghi de 45° față de masă, au valoarea medie a microdurității Vickers egală din punct de vedere statistic, atunci când forța de măsurare este aplicată paralel cu stratul de fabricație. În concluzie poziționarea piesei în raport cu masa de fabricație nu influențează valoarea microdurității Vickers pe direcția paralelă cu stratul de fabricație, în cazul unui strat de fabricație de 30 [μm] (figura 3.85 și tabelul 3.32).
 - În ceea ce privește valoarea abaterii standard nu există diferențe din punct de vedere statistic între eșantioane .
- Când forța de măsurare a microdurității este aplicată perpendicular pe stratul de fabricație se observă că:
 - Piesele fabricate așezate paralel cu masa de fabricație au o valoare medie a microdurității cu 15 puncte mai mică decât cea a pieselor fabricate la un unghi de 45° față de masa de fabricație (tabelul 3.32).
 - În ceea ce privește valoarea abaterii standard nu există diferențe din punct de vedere statistic între eșantioane
- De asemenea, când comparăm microduratea măsurată perpendicular pe stratul de fabricație față de cea măsurată paralel cu stratul de fabricație, se observă că piesele poziționate paralel cu masa de fabricație prezintă o creștere a microdurității măsurate paralele cu stratul de fabricație, pe când cele poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație prezintă o scădere a microdurității măsurate paralel cu stratul de fabricație.
- În ceea ce privește valoarea abaterii standard față de valoarea medie, deși valorile nu par să coincidă, nu există o diferență semnificativă între cele șase eșantioane, din punct de vedere statistic (figura 3.86).

3.9.2. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm]

Pentru a prezenta concluzii legate de diferențele dintre mediile și dispersiile seturilor de date ale pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm] s-a realizat o analiza ANOVA pentru fiecare indicator statistic, o analiză pentru valoarea mediilor (figura 3.87) și altă analiză pentru valoarea abaterii față de valoarea medie (figura 3.88). De asemenea valorile mediei și ale abaterii standard se regăsesc în tabelul 3.33.

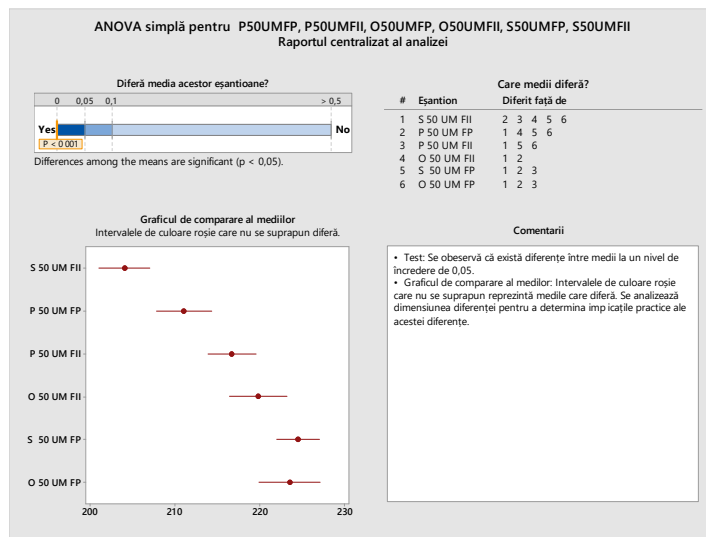


Fig. 3.18. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile medii pentru eșantioanele ce aparțin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm] diferă

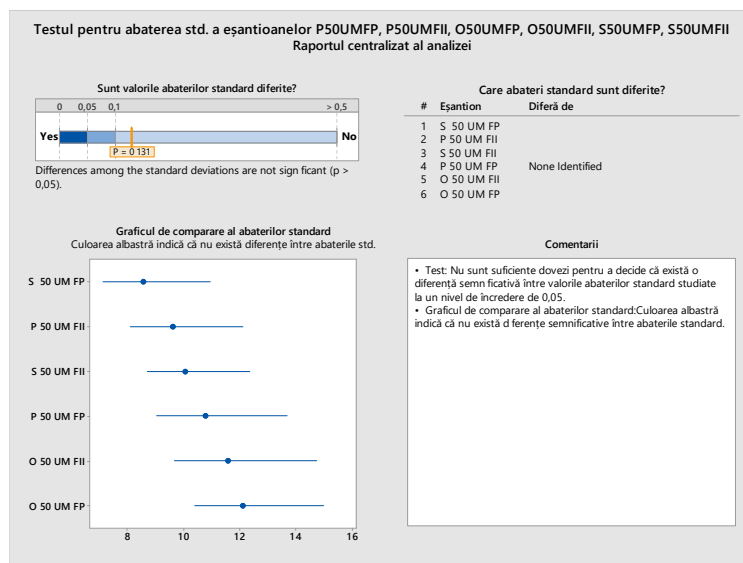


Fig. 3.19. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile abaterilor standard pentru eșantioanele ce aparțin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm] diferă

În urma analizei pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 50[μm] se pot evidenția următoarele aspecte:

- Când forța de măsurare a microdurității este aplicată paralel cu stratul de fabricație se observă că:
 - Când se folosește un strat de pulbere de 50[μm], procesul de fabricație capătă o variabilitate mai mare în ceea ce privește microduritatea măsurată paralel cu stratul de fabricație și se observă că această variabilitate nu mai ține cont de poziționarea

piesei sau grosimea stratului de pulbere (fiind mai mare) care anulează influența poziționării piesei în raport cu masa de fabricație iar rezultatele depind doar de variația celorlați parametri de fabricație (putere laser, viteză de scanare, timp de răcire, dimensiunea bălții de metal topit etc.), figura 3.87 și tabelul 3.33.

- În ceea ce privește valoarea abaterii standard nu există diferențe din punct de vedere statistic între eșantioane.
- Când forța de măsurare a microdurității este aplicată perpendicular pe stratul de fabricație se observă că:
 - Dacă, la piesele fabricate poziționate paralel cu masa de fabricație (placă), se observă o scădere a valorii medii a microdurității măsurate perpendicular pe stratul de fabricație, la piesele fabricate poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație (oval, stea), se observă o creștere a valorii medii a microdurității măsurate perpendicular pe strat (tabelul 3.33).
 - În ceea ce privește valoarea abaterii standard nu există diferențe din punct de vedere statistic între eșantioane.
- De asemenea, când comparăm microduratea măsurată perpendicular pe stratul de fabricație față de cea măsurată paralel cu stratul de fabricație, se observă că piesele poziționate paralel cu masa de fabricație prezintă o creștere a microdurității măsurate paralele cu stratul de fabricație, pe când cele poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație prezintă o scădere a microdurității măsurate paralel cu stratul de fabricație.
- În ceea ce privește valoarea abaterii standard față de valoarea medie, deși valorile nu par să coincidă, nu există o diferență semnificativă între cele șase eșantioane, din punct de vedere statistic (figura 3.88).

Tabelul 3.7. Centralizator pentru valoarea mediei și a abaterii standard pentru eșantioanele pieselor fabricate cu un strat de fabricație de 50[μm]

Nr. crt.	Nume variabilă	Număr măsurători (eșantion) validate	Valoarea medie [HV]	Abaterea standard [HV]
1.	P 50 UM FP	46	211,05	10,770
2.	P 50 UM FII	50	216,67	9,6198
3.	O 50 UM FP	48	223,45	12,102
4.	O 50 UM FII	50	219,74	11,595
5.	S 50 UM FP	50	224,45	8,5743
6.	S 50 UM FII	48	204,04	10,064

3.9.3. Piese fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm] și 50[μm]

Pentru a putea concluziona referitor la diferențele dintre mediile și dispersiile eșantioanelor ce reprezintă microduritățile Vickers interne ale pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm] și 50[μm] s-a realizat câte o analiză ANOVA pentru fiecare indicator statistic. O analiză pentru valoarea mediilor (figura 3.89) și alta pentru valoarea abaterii față de valoarea medie (figura 3.90). De asemenea, valorile mediei și ale abaterii standard se regăsesc în tabelul 3.34.

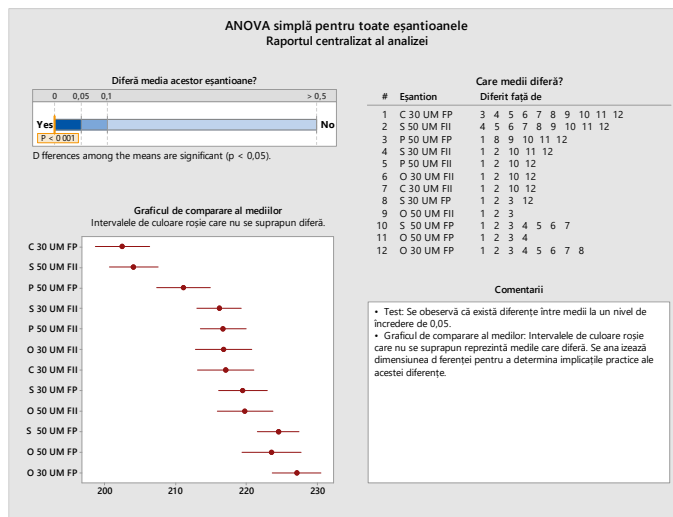


Fig. 3.20. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile medii pentru eşantioanele ce aparţin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μ m] şi 50[μ m] diferă

Tabelul 3.8. Centralizator pentru valoarea mediei şi a abaterii standard pentru eşantioanele pieselor fabricate cu un strat de fabricaţie de 30[μ m] şi 50[μ m] şi forţa de măsurare aplicată paralel

Nr. crt.	Nume variabilă	Număr măsurători (eşantion) validate	Valoarea medie [HV]	Abaterea standard [HV]
1.	C 30 UM FII	49	217,03	11,750
2.	O 30 UM FII	50	216,73	11,775
3.	S 30 UM FII	48	216,09	9,0289
4.	P 50 UM FII	50	216,67	9,6198
5.	O 50 UM FII	50	219,74	11,595
6.	S 50 UM FII	48	204,04	10,064

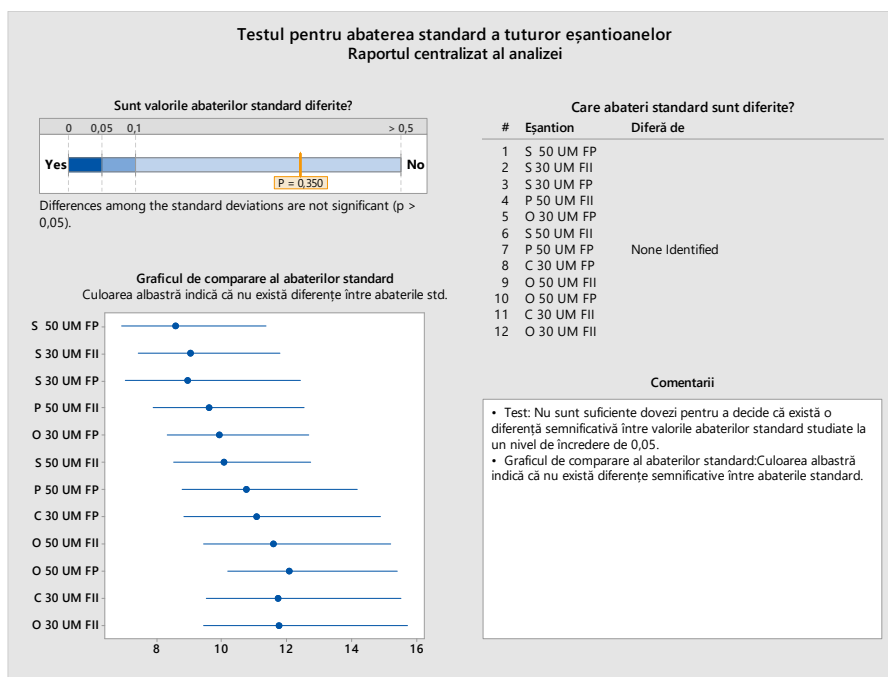


Fig. 3.21. Testul ANOVA ce verifică ipoteza statistică dacă valorile abaterilor standard pentru eşantioanele ce aparţin pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μ m] şi 50[μ m] diferă

În urma analizei pieselor fabricate cu un strat de pulbere de 30[μm] și 50[μm] se pot prezenta următoarele concluzii:

- Când forța de măsurare este aplicată paralel pe stratul de fabricație se observă că:
 - Indiferent de modul în care piesa este poziționată piesa în raport cu de masa de fabricație sau de grosimea stratului de fabricație se observă că valoarea microdurității pe direcția paralelă cu stratul de fabricație este identică din punct de vedere statistic (figura 3.89 și tabelul 3.34). Singura valoare ce nu corespunde este cea apieseii de tip stea realizate cu un strat de pulbere de 50 [μm], dar după cum se poate observa în histograma din figura 3.89, datele au o asimetrie către stânga. Acest eșantion ar putea reprezenta un eșantion aberant, sau poate să fie generat de erori de măsurare sau de alegerea zonei de măsurare. Totodată acest eșantion poate rezulta și din variabilitate mult mai mare pe care o are o strategie de fabricație, în care se folosește un strat de 50 [μm].
 - În ceea ce privește valoarea abaterii standard față de valoarea medie nu există o diferență semnificativă din punct de vedere statistic între cele șase eșantioane (figura 3.90).
- Când forța de măsurare este aplicată perpendicular pe stratul de fabricație se observă că:
 - La piesele poziționate paralel cu masa de fabricație (clichet, placă), se observă o scădere a valorii medii a microdurității măsurate perpendicular pe stratul de fabricație (tabelul 3.35 și figura 3.89).
 - În ceea ce privește valoarea abaterii standard față de valoarea medie nu există o diferență semnificativă din punct de vedere statistic între cele șase eșantioane (figura 3.90).
- De asemenea, când comparăm microduritatea măsurată perpendicular pe stratul de fabricație cu cea măsurată paralel cu stratul de fabricație, se observă că piesele poziționate paralel cu masa de fabricație (placa,clichetul) prezintă o creștere a microdurității măsurate paralel cu stratul de fabricație, pe când cele poziționate la un unghi de 45° față de masa de fabricație, se evidențiază o scădere a microdurității măsurate paralel cu stratul de fabricație (tabelele 3.34 și 3.35 și figura 3.89) exceptând piesa de tip stea realizată cu un strat de pulbere de 50 [μm].
- În ceea ce privește valoarea abaterii standard față de valoarea medie nu există o diferență semnificativă din punct de vedere statistic între cele doisprezece eșantioane (figura 3.90).

Tabelul 3.9. Centralizator pentru valoarea mediei și a abaterii standard pentru eșantioanele pieselor fabricate cu un strat de fabricație de 30[μm] și 50[μm] și forța de măsurare aplicată perpendicular

Nr. crt.	Nume variabilă	Număr măsurători (eșantion) validate	Valoarea medie [HV]	Abaterea standard [HV]
1.	C 30 UM FP	48	202,47	11,081
2.	O 30 UM FP	48	227,02	9,9183
3.	S 30 UM FP	39	219,45	8,9428
4.	P 50 UM FP	46	211,05	10,770
5.	O 50 UM FP	48	223,45	12,102
6.	S 50 UM FP	50	224,45	8,5743

3.9.4. Recomandări pentru fabricarea pieselor metalice prin procesul SLM utilizând strategiile de fabricație de 30[μm] și 50[μm]

După cum se poate constata în subcapitolul 3.8.3, din punct de vedere statistic microduratea Vickers a pieselor fabricate cu strategiile de fabricație de 30[μm] și 50[μm] este asemănătoare. Valoarea medie este de 216,37[HV] și a abateri standard de 12,76 [HV] pentru strategia de 30[μm], pe când la ce de 50[μm] valoarea mediei este de 216,68 [HV], iar abaterea este de 12,62 [HV]. Din punctul de vedere al microdurateții Vickers, cele două strategii de fabricație conduc la obținerea unor piese identice. De aceea, se recomandă ca piesele să fie fabricate utilizând strategia cu un strat de pulbere de 50[μm], deoarece aceasta reduce semnificativ timpul de fabricație (tabelul 3.36).

Tabelul 3.10. Timpii de fabricație pentru piesele studiate, considerând strategiile de 30[μm] și 50[μm]

Strategia de fabricație	Timpul de preprocesare	Timpul de inițializare mașină	Timpul de fabricație	Timpul de postprocesare
30 [μm]	2h	2h	8h	2h
50 [μm]	2h	2h	5h	2h

Tabelul 3.11. Valorile medii ale microdurateții Vickers și ale timpului de fabricație pentru piesele studiate, realizate cu strategii de fabricație de 30[μm] și 50[μm].

Strategia de fabricație	Poziția piesei față de masa de fabricație	Valoarea medie a microdurateții Vickers pe direcția paralelă [HV]	Valoarea medie a microdurateții Vickers pe direcția perpendiculară [HV]	Valoarea medie a microdurateții Vickers pe direcția perpendiculară în raport cu cea paralelă	Timp de fabricație [h]
30 [μm]	Paralelă	C 30 UM FII 217,03	C 30 UM FP 202,47 [HV]	Scade	7h
30 [μm]	La un unghi de 45°	O 30 și S30 UM FII 216,73 și 216,09	O 30 și S30 UM FP 227,02 și 219,45	Crește	8h
50 [μm]	Paralelă	P 50 UM FII 216,67	P 50 UM FP 211,05	Scade	4h
50 [μm]	La un unghi de 45°	O 50 și S 50 UM FII 219,74 și 204,04	O 50 și S 50 UM FP 223,45 și 224,45	Crește	5h

Un factor important în fabricația pieselor utilizând procedeul SLM este poziționarea piesei în raport cu masa de fabricație. După cum se poate observa în tabelul 3.37 poziționarea pe masa de fabricație a piesei este direct proporțională cu timpul de fabricație. Astfel piesele poziționate paralel cu masa de fabricație au timpul de fabricație mai mic (acest lucru se datorează înălțimii totale a piesei cu suporturi de fabricație și a unui număr mai mic de straturi de fabricație), pe când cele poziționate la un unghi de 45° au un timp de fabricație mai mare, datorat creșterii numărului de straturi de fabricație. Creșterea numărului de straturi este generată de modificarea înălțimii totale a piesei finale (piesă formată din suporturi de construcție și piesa propriu-zisă).

Însă cu micșorarea timpului de fabricație apare și o descreștere a valorii medii a durității Vickers pe direcție perpendiculară cu stratul de fabricație, după cum se poate observa și în tabelul 3.35. Odată cu reducerea timpului de fabricație se micșorează și microduratea, pe când o creștere a timpului de fabricație (prin modificarea poziționării) prin înclinarea piesei, conduce și la o creștere a microdurateții.

În urma cercetărilor prezentate în acest capitol, se recomandă ca reducerea timpului de fabricație să se realizeze, exclusiv prin modificarea strategiei de fabricație bazată pe un strat de pulbere mai mare.

Este de dorit să se evite poziționarea piesei paralel cu masa de fabricație deoarece această poziționare conduce la valori ale microdurității mai mici. Poziționarea piesei paralelă cu masa de lucru se poate folosi atunci când duritatea piesei nu este foarte importantă și contează doar timpul de fabricație. Modificarea poziției piesei se realizează în cazul în care acesta este impusă de considerente tehnice.

Capitolul 4. Microstructura pieselor fabricate prin topire selectivă cu laserul

4.1. Metodologie de analiza a modificărilor microstructurii pieselor fabricate cu straturi de grosime de 30 și 50 micrometri

În prezentul capitol se realizează analiza cantitativă și calitativă a microstructurii pieselor fabricate prin topire selectivă cu laserul, în cazul utilizării a două mărimi ale stratului de lucru, 30[μm] și 50[μm]. Analiza este efectuată printr-un studiu al grăunților din structura internă a pieselor.

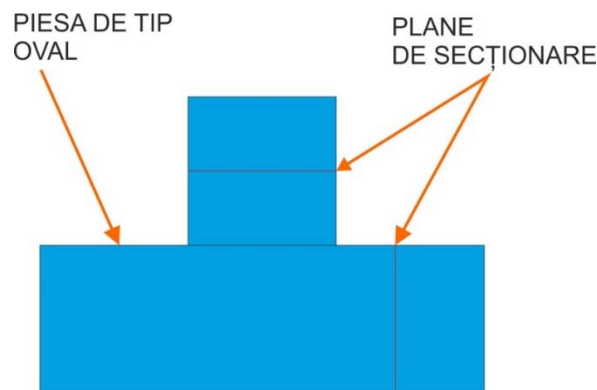


Fig. 4.1. Planurile de secționare pentru piesa de tip oval fabricată cu o grosime a stratului de fabricație de 30 [μm] și 50[μm]

Pentru a se realiza analiza metalografică se utilizează următoarea metodologie:

- Se fabrică piese utilizând câte o strategie de fabricație diferită astfel:
 - piese prin strategia de fabricație ce utilizează un strat de pulbere de 50 [μm] grosime;
 - piese prin strategia de fabricație ce utilizează un strat de pulbere de 30 [μm] grosime.
- Piesele obținute prin cele 2 strategii de fabricație sunt pregătite pentru analiza metalografică, parcurgând următoarele etape:
 - piesele se taie pe cele 2 direcții de fabricație (paralel cu masa de fabricație și perpendicular cu masa de fabricație (figura 4.1.) cu un disc abraziv utilizându-se și lichid de așchiere (figura 4.2);
 - secțiunile obținute prin tăierea pieselor sunt încastrate în rășină;
 - piesele încastrate în rășină sunt montate într-un dispozitiv de prelucrare la rece a suprafeței, prin șlefuire cu hârtie abrazivă care are granulație din ce în ce mai mică (granulație de 1500, 2000 și 2500);
 - pentru a evidenția grăunții structurii interne, suprafețele șlefuite sunt supuse unei transformări chimice, prin tratarea lor cu apă regală. Apa regală este un amestec de acid nitric (o parte) cu acid clorhidric (trei părți). Timpul de tratare este de până la 30 de secunde, după care piesa este clătită cu apă curată.

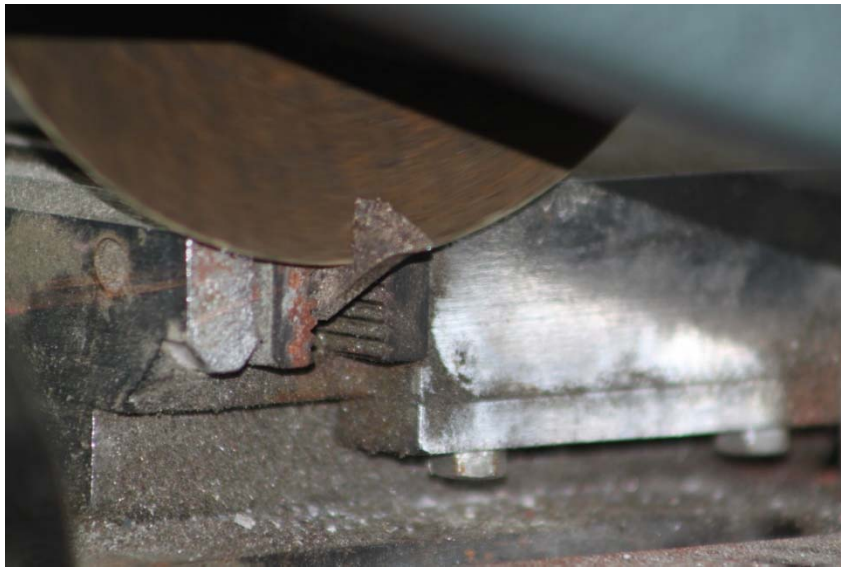


Fig. 4.2. Tăierea piesei de analizat, utilizând un disc abraziv , [BUI15]

- Se realizează preluarea imaginilor metalografice cu ajutorul unui microscop optic:
 - fiecare piesă este așezată pe masa microscopului, după care se analizează partea tratată cu apa regală utilizând diferiți factori de mărire. În acest caz s-a folosit o scară de mărire de 20X și una de 200X. Cele mai relevante imagini sunt cele realizate la o scară de mărire de 200X, de aceea în ele este plasată și o scară de măsurare de 100 [μm];
 - pentru fiecare piesă, se preiau câte 4 imagini la scara de 200X, două pentru suprafața paralelă cu masa de fabricație și 2 pentru suprafața perpendiculară pe masa de fabricație.
- Analiza microstructurii se realizează utilizând sistemele software Adobe Photoshop și Excel:
 - imaginile se încarcă în Adobe Photoshop, unde se prelucrează pentru a se îmbunătăți contrastul și luminozitatea;
 - peste imaginea normală s-a suprapus un alt strat pe care sunt evidențiați grăunții utilizând culori diferite, după care se adaugă un alt strat unde grăunții sunt numerotați și colorați în funcție de forma lor;
 - se identifică tipul de grăunți; în acest caz, trei tipuri:
 - în formă de picătură;
 - cu formă alungită;
 - cu formă nedefinită (părți din alți grăunți care nu au mai încăput în imagine);
 - celor trei tipuri de grăunți li se atribuie câte o etichetă, după cum urmează:
 - **Nr. tip – culoare** (ex: 1p – roșu) în care:
 - **Nr.** reprezintă numărul grăuntelui (se începe de la 1 și se termină cu numărul ultimului grăunte din cel tip);
 - **Tip** poate lua doar trei valori (**P** – pentru grăunți în formă de picătură, **L** – pentru grăunți cu formă alungită și **N** - pentru grăunți cu formă nedefinită);
 - **Culoare** are trei valori: **roșu** pentru grăunți în formă de picătură, **albastru** pentru grăunții alunghiți și **verde** pentru grăunții nedefiniți;
 - în afară de numărul și tipul grăunților se determină și aria grăunților;

- datele referitoare la grăunți, eticheta atașată și aria aferentă, sunt înregistrate într-un fișier Excel în care se realizează analiza;
- cu aceste date se realizează o analiză statistică, prin calculare frecvențelor relative și absolute ale tipurilor de grăunți dar și ale ariei, pentru fiecare imagine în parte;
- valorile obținute sunt apoi grupate pe strategii de fabricație 30[μm] și 50[μm] pentru a se realiza un studiu comparativ și pentru a se putea identifica de unde provin diferențele de la studiul microdurității.

Metodologia prezentată anterior, este aplicată în cazul piesei de tip oval prezentată în figura 3.9. Oval (O 30 UM) fabricat prin procedeul SLM de 30 [μm] [BUI15] și codificată:

- O 30 UM FP pentru oval fabricat cu un strat de pulbere de 30 [μm] și tăietura perpendiculară pe stratul de fabricație;
- O 30 UM FII pentru oval fabricat cu un strat de pulbere de 30 [μm] și tăietura paralelă cu stratul de fabricație;
- O 50 UM FP pentru oval fabricat cu un strat de pulbere de 50 [μm] și tăietura perpendiculară pe stratul de fabricație;
- O 50 UM FII pentru oval fabricat cu un strat de pulbere de 50 [μm] și tăietura paralelă cu stratul de fabricație.

În acest capitol, se folosesc aceleași codificări ale pieselor, ca și în capitolul precedent.

4.2. Analiza pieselor de tip oval fabricate cu strat de 30 [μm] și 50[μm]

Piese de formă ovală codificate O 30 UM și O 50 UM, realizate cu o strategie de fabricație ce utilizează un strat de 30 [μm] și respectiv 50[μm], au fost pregătite pentru analiza metalografică utilizând metodologia descrisă anterior.

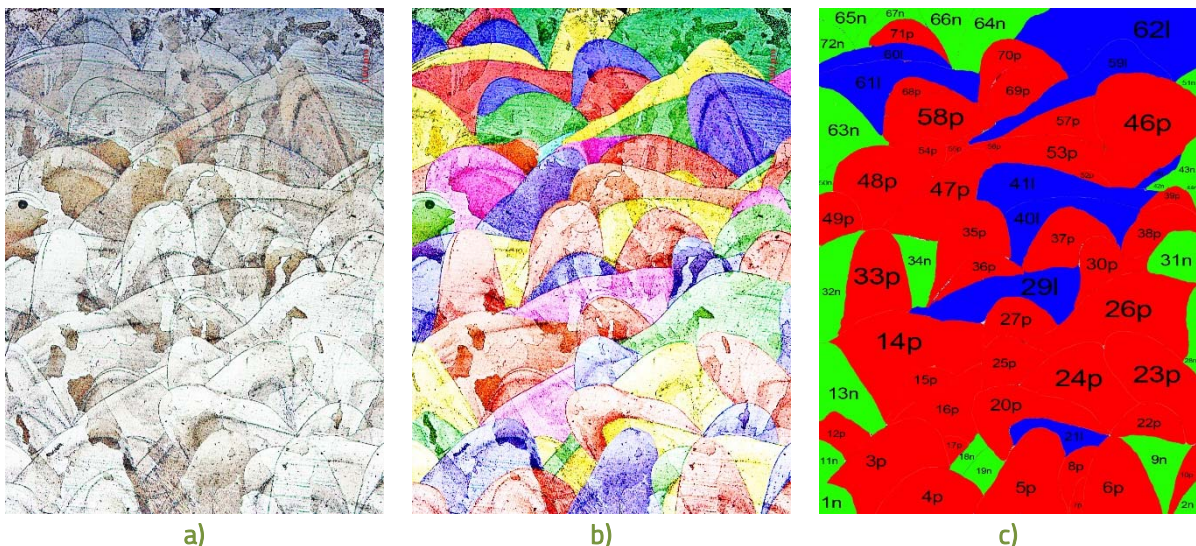


Fig. 4.3. O 30 UM FP 200X – 1: a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori pentru grăunți suprapus și c) imagine cu grăunții numerotați și colorați conform convenției din metodologie, [BUI15]

Piesele tăiate și încastrate în rășină au fost tratate cu apă regală și așezate sub microscop pentru a putea fi analizate.

La microscop au fost realizate câte 4 imagini pentru fiecare piesă, 2 cu suprafața paralelă cu stratul de fabricație și 2 cu suprafața perpendiculară pe stratul de fabricație, la un factor de mărire de 200X. De

asemenea, pe imaginile obținute la microscop a fost suprapusă și o scară de 100 [μm] pentru a se putea efectua măsurători pe acestea.

Prima imagine analizată este cea a piesei de tip oval realizată cu o strategie de fabricație de 30 [μm], tăietura perpendiculară pe strat și scara de 200X, identificată cu codul: O 30 UM FP 200X – 1. Imaginea a fost prelucrată în Photoshop pentru a se putea evidenția grăunții, dar și pentru a se putea realiza numărarea lor. În figura 4.3 sunt prezentate:

- imaginea din stânga (figura 4.3. a) a fost realizată la microscop și prelucrată în Photoshop pentru a se îmbunătăți luminozitatea;
- imaginea din mijloc (figura 4.3. b) realizată la microscop peste care s-a suprapus un strat de culori. Acest pas a fost realizat pentru a se putea pune în evidență fiecare grăunte și limitele de separație dintre grăunți;
- imaginea din dreapta (figura 4.3. c) prezintă grăunții numerotați și colorați conform convenției stabilite anterior.

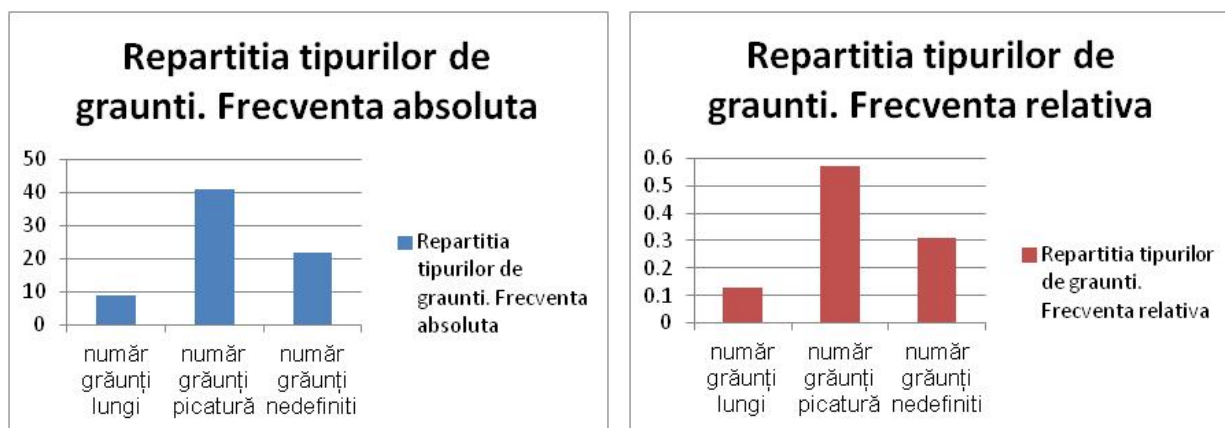


Fig. 4.4. O 30 UM FP 200X – 1- Frecvență relativă și absolută a tipurilor de grăunți

Pentru datele astfel obținute, s-a efectuat analiza statistică, mai exact s-a calculat frecvența relativă și absolută de apariție a fiecărui tip de grăunte în imaginea studiată. Aceste date sunt prezentate în tabelul 4.1 și reprezentate grafic în figura 4.4.

Tabelul 4.1. Frecvența relativă și absolută de apariție a grăunților în imaginea O 30 UM FP 200X – 1

Număr total de grăunți	Tip grăunți	Frecvență absolută	Frecvență relativă
72	grăunți alungiți	9	0.13
	grăunți picătura	41	0.57
	grăunți nedefiniți	22	0.31

După analiza distribuției tipurilor de grăunți s-a realizat analiza distribuției ariei grăunților. Primul pas al acestei analize a constat în calcularea parametrilor statistici. Aceștia sunt prezentați în Tabelul 4.2. Cu ajutorul parametrilor statistici s-au putut calcula numărul de clase (intervale) și limitele acestora utilizând metoda de calcul a claselor Kecicioglu [KECO2, MOR10, MOR13]. Rezultatele acestor calcule sunt prezentate în tabelul 4.3.

Pe baza limitelor stabilite se poate realiza histograma frecvențelor relative și absolute ale ariei grăunților O 30 UM FP 200X – 1. Acest calcul se regăsește în Tabelul 4.4.

Tabelul 4.2. Calculul indicatorilor statistici pentru aria grăunților din imaginea O 30 UM FP 200X – 1

Denumire indicator statistic	Valoare indicatori statistici
Valoarea minimă	356.91 [μm^2]
Valoarea maximă	12939.26 [μm^2]
Valoarea medie	3902.88 [μm^2]
Valoarea mediane	3217.76 [μm^2]
Valoarea modei	31012.02 [μm^2]
Abaterea medie pătratică	3117.99 [μm^2]
Amplitudinea	12582.35 [μm^2]
Boltire - curba ascuțita >0 mai plata ca normala <0	0.92
Asimetrie - asimetrie dreapta $sk>0$ asimetrie stânga $sk<0$	1.13

Tabelul 4.3. Calculul claselor și a limitelor claselor pentru aria grăunților din imaginea O 30 UM FP 200X – 1

Denumire parametru	Valoare parametru	
Interval valori	12582.35 [μm^2]	
Număr de clase	8	
Mărimea clasei	1572.79 [μm^2]	
	Clase	
Nr. clasă	Limita inferioară clasă [μm^2]	Limita superioară clasă [μm^2]
1	356.91	1929.70
2	1929.704	3502.498
3	3502.498	5075.292
4	5075.292	6648.086
5	6648.086	8220.88
6	8220.88	9793.674
7	9793.674	11366.47
8	11366.468	12939.36

Tabelul 4.4. Frecvența relativă și absolută a ariei grăunților din imaginea O 30 UM FP 200X – 1

Număr total de grăunți	Nume clasă	Limite Clase [μm^2]	Frecvența absolută	Frecvența relativă
72	1	356.91 - 1929.70	25.00	34.72%
	2	1929.70 - 3502.50	14.00	19.44%
	3	3502.50 - 5075.29	11.00	15.28%
	4	5075.29 - 6648.09	8.00	11.11%
	5	6648.09 - 8220.88	9.00	12.50%
	6	8220.88 - 9793.67	1.00	1.39%
	7	9793.67 - 11366.47	0.00	0.00%
	8	11366.47 - 12939.36	4.00	5.56%
Total			72	100%

Cu datele din tabelul 4.4, s-au realizate cele doua grafice ale histogramelor frecvențelor relative și absolute pentru aria grăunților din imaginea O 30 UM FP 200X – 1 prezentate în figura 4.5.

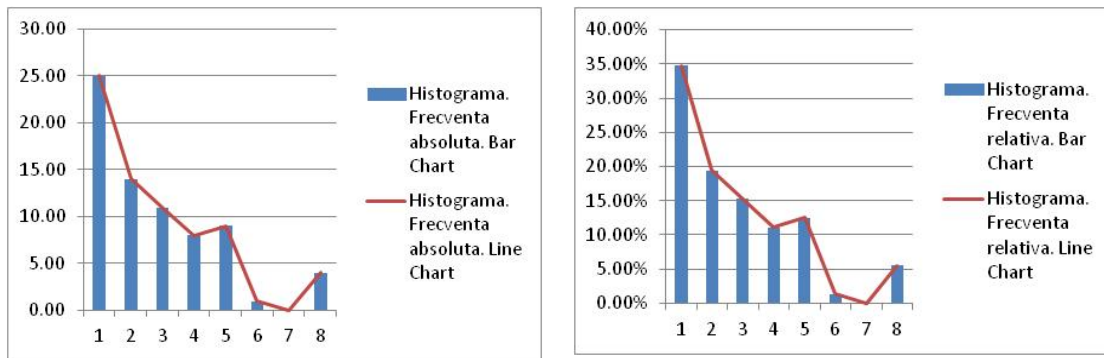


Fig. 4.5. Histograma frecvențelor relativă și absolută a ariei grăunților din imaginea O 30 UM FP 200X-1

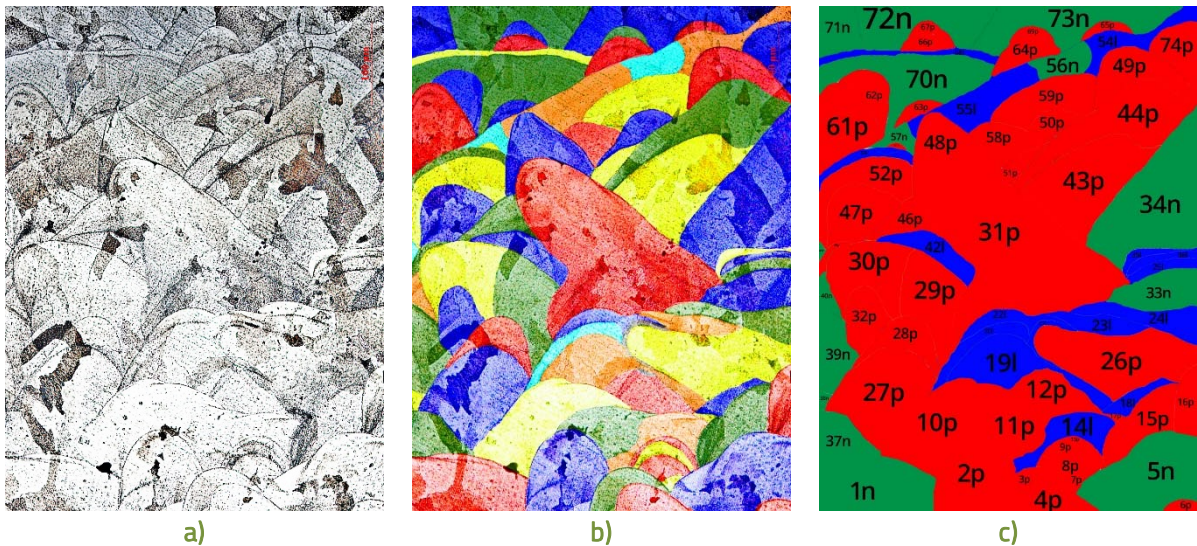


Fig. 4.6. O 30 UM FP 200X – 2, a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) imagine cu grăunții numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

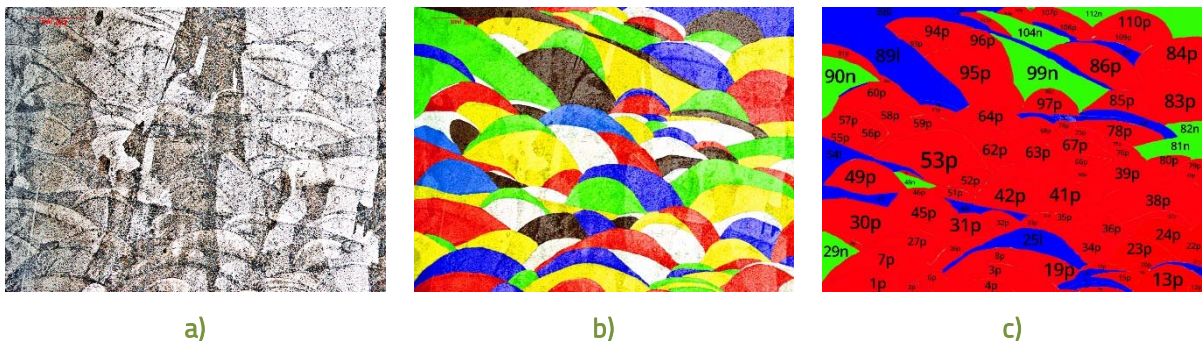


Fig. 4.7. O 30 UM FII – 3, a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) imagine cu grăunții numerotați și colorați conform convenției din metodologie. [BUI15]

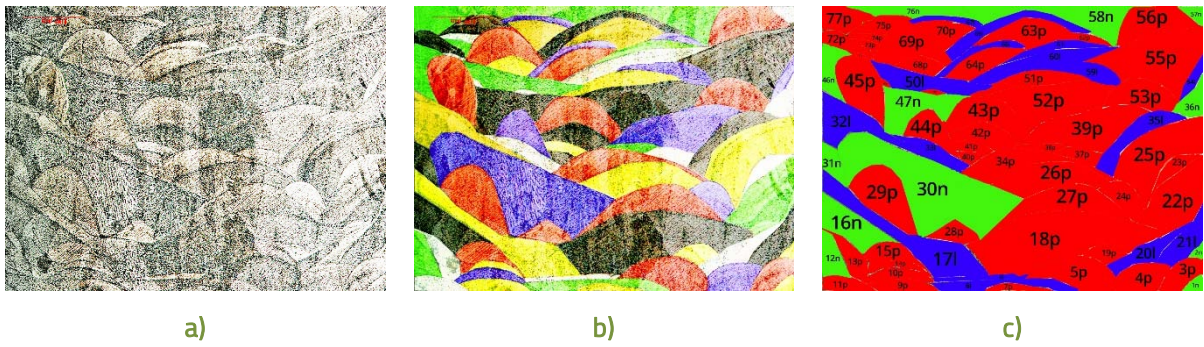


Fig. 4.8. O 30 UM FII 200X – 4, a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) imagine cu grăunții numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

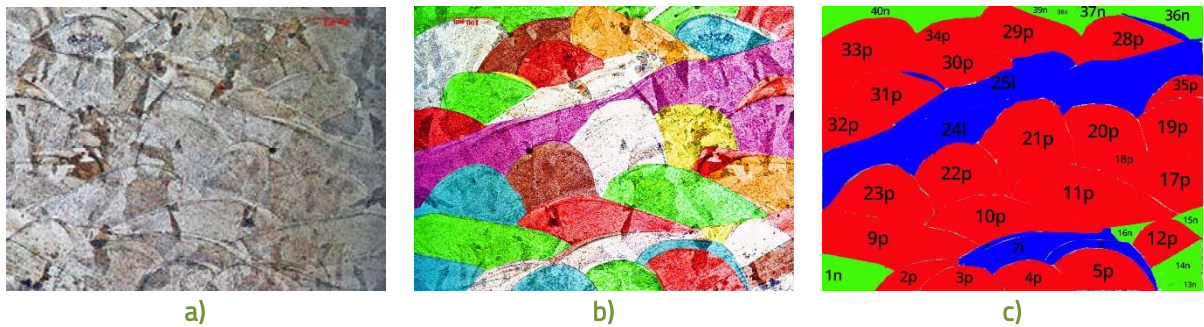


Fig. 4.9. O 50 UM FP 200 X– 1, a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) grăunții numărați, numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

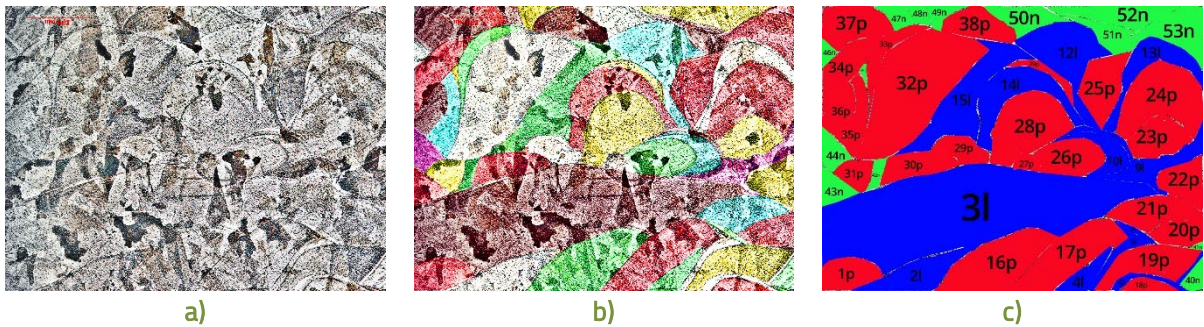


Fig. 4.10. O 50 UM FP 200X– 2 : a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) grăunții numărați, numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

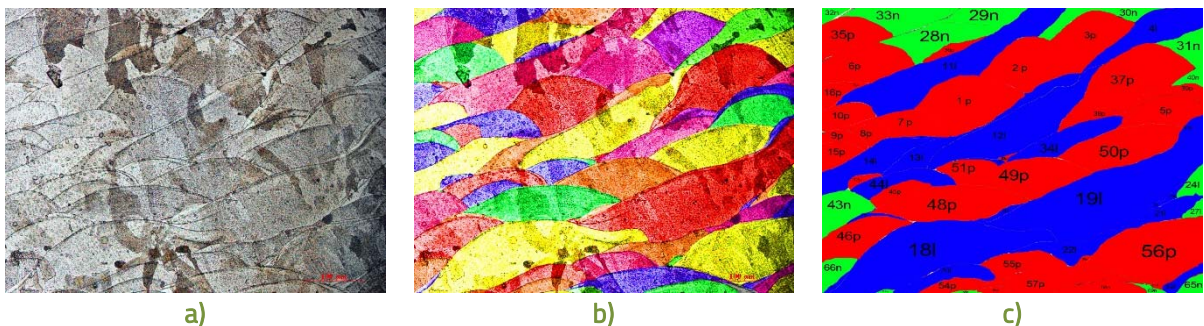


Fig. 4.11. O 50 UM FII 200X – 3 , a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) grăunții numărați, numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

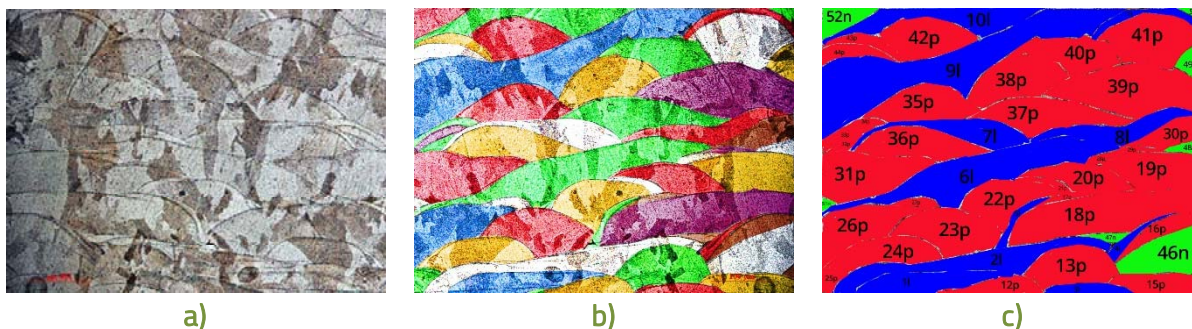


Fig. 4.12. O 50 UM FII 200X– 4 : a) imagine microscop, b) imagine microscop cu strat de culori și c) grăunții numărați, numerotați și colorați conform convenției din metodologie [BUI15]

4.3. Analiza datelor cumulate pentru imaginile cu factor de mărire 200X aferente piesele codificate O 30 UM si O 50 UM,

După analiza individuală a fiecărei imagini în parte, se grupează cele 4 imagini pe fiecare strategie de fabricație, într-un singur eșantion, rezultând în acest fel câte un eșantion pentru fiecare strategie de fabricație.

4.3.1. Analiza datelor cumulate pentru imaginile aferente piesei codificată O 30 UM

Pentru primul eșantion de date, cel asociat strategiei de fabricație cu mărime a stratului de 30 [μm], se efectuează aceeași analiză a frecvenței de distribuție a grăunților, în funcție de tipul grăuntelui, după care se efectuează analiza distribuției ariei grăunților. Sintetic, rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 4.19, 4.20 , figurile 4.27 , 4.28 precum și în Anexa 36.

Tabelul 4.19. Frecvența relativă și absolută a grăunților din imaginile aferente piesei O 30 UM

Număr total de grăunți	Tip grăunți	Frecvența absolută	Frecvența relativă
336	grăunți alungiți	64	0.19
	grăunți picătura	216	0.64
	grăunți nedefiniți	56	0.17

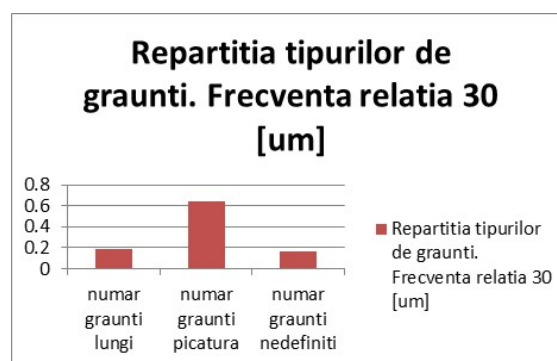
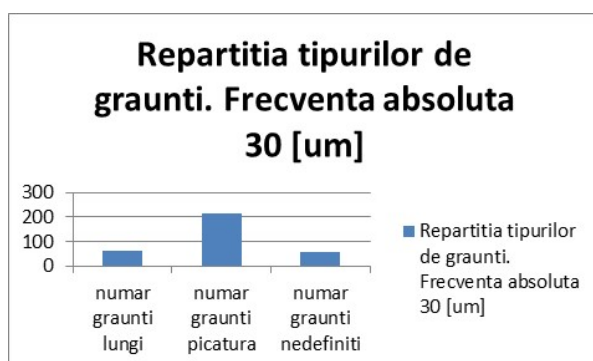


Fig. 4.13. O 30 UM, frecvența relativă și absolută a tipurilor de grăunți

Tabelul 4.20. Frecvența relativă și absolută a ariei grăunților din imaginile aferente piesei O 30 UM

Număr total de grăunți	Nume clasă	Limite Clase [μm^2]	Frecvența absolută	Frecvența relativă
336	1	54.94 - 3399.37	214.00	63.69%
	2	3399.37 - 6743.80	80.00	23.81%
	3	6743.80 - 10088.23	29.00	8.63%
	4	10088.23 - 13432.66	7.00	2.08%
	5	13432.66 - 16777.09	2.00	0.60%
	6	16777.09 - 20121.51	1.00	0.30%
	7	20121.51 - 23465.94	1.00	0.30%
	8	23465.94 - 26810.37	0.00	0.00%
	9	26810.37 - 30154.80	1.00	0.30%
	10	30154.80 - 33499.33	1.00	0.30%
Total			336	100%

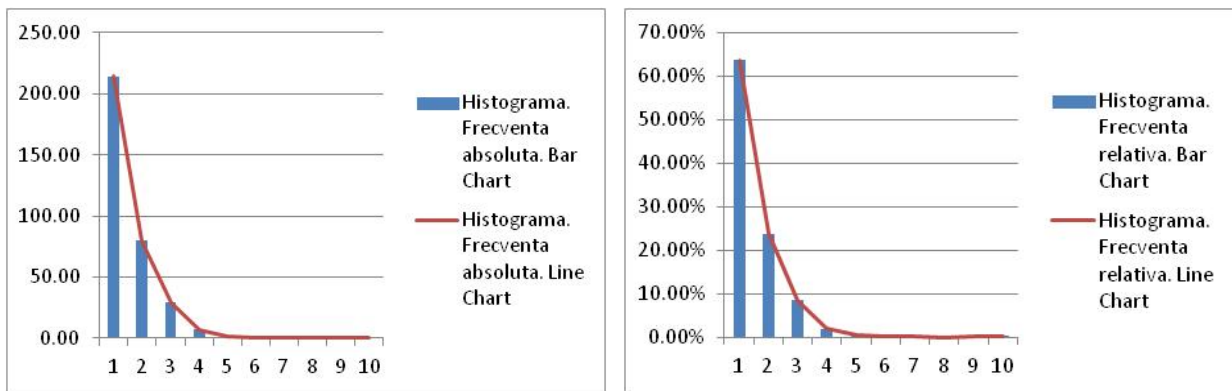


Fig. 4.14. O 30 UM, histograma frecvențelor relativă și absolută a ariei grăunților

4.3.2. Analiza datelor cumulate pentru imaginile aferente piesei codificată O 50 UM

Și în acest caz, datele (din seturile de 50 [μm]) sunt grupate, rezultând un nou eșantion pe care se efectuează aceeași analiză a frecvenței de distribuție a grăunților în funcție de tipul grăunțului și analiza distribuției arie grăunților. Aceste analize sunt prezentate în tabelele și figurile de mai jos, iar restul datelor cu tabelul setului de date, indicatorii statistici și calculul intervalelor claselor histogramei ariei grăunților se regăsesc în Anexa 37.

Tabelul 4.21. Frecvența relativă și absolută a grăunților din imaginile aferente piesei cu codul O 50 UM

Număr total de grăunți	Tip grăunți	Frecvența absolută	Frecvența relativă
214	grăunți alungiți	53	0.25
	grăunți picătura	114	0.53
	grăunți nedefiniți	47	0.22

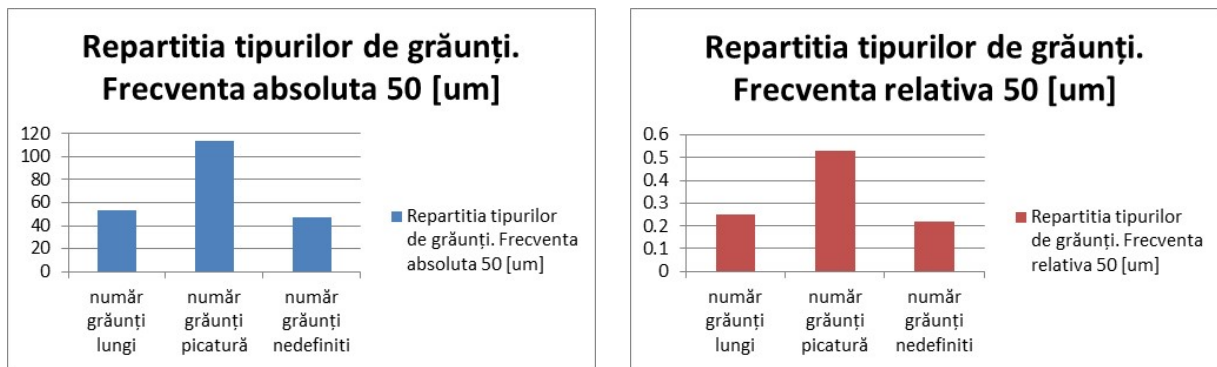


Fig. 4.15. O 50 UM, frecvența relativă și absolută a tipurilor de grăunți

Tabelul 4.22. Frecvența relativă și absolută a ariei grăunților din imaginile aferente piesei cu codul O 50 UM

Număr total de grăunți	Nume clasă	Limite Clase [μm^2]	Frecvența absolută	Frecvența relativă
214	1	130.03 - 2894.14	95.00	44.39%
	2	2894.14 - 5658.24	47.00	21.96%
	3	5658.24 - 8422.35	35.00	16.36%
	4	8422.35 - 11186.45	20.00	9.35%
	5	11186.45 - 13950.56	6.00	2.80%
	6	13950.56 - 16714.66	7.00	3.27%
	7	16714.66 - 19478.77	1.00	0.47%
	8	19478.77 - 22242.87	1.00	0.47%
	9	22242.87 - 25007.08	2.00	0.93%
Total			214	100%

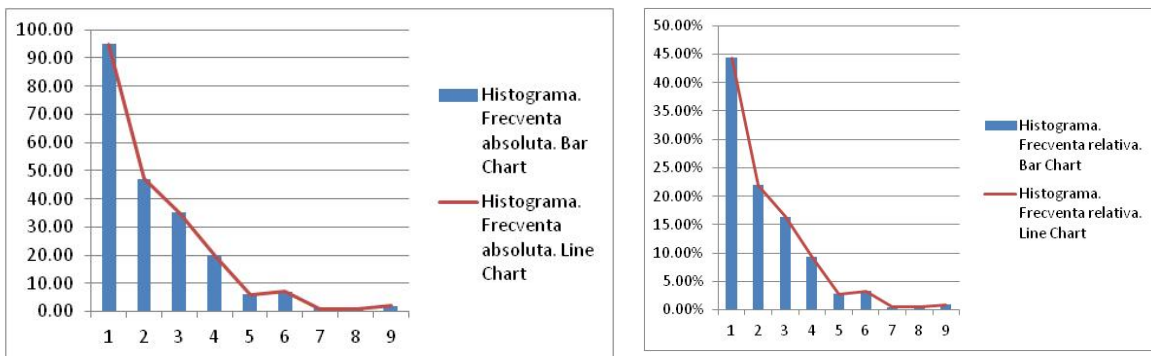


Fig. 4.16. O 50 UM, histograma frecvențelor relativă și absolută a ariei grăunților

4.4 Concluzii

Din tabelul 4.23. se observă că strategia de fabricație cu un strat de pulbere de 30 [μm] conduce la fabricarea unor piese cu o densitate mai mare de grăunți (336 grăunți față de 214 grăunți) ceea ce reprezintă cu 57% mai mulți grăunți. Valoarea medie este dublă la strategia de fabricație cu un strat de pulbere mai mic. Acest lucru conduce la o densitate mai mare de grăunți de tip picatură, ceea ce este de dorit în practică.

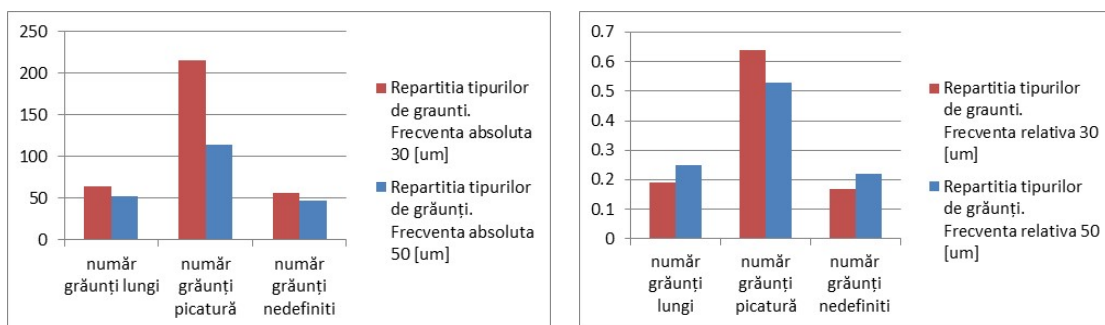


Fig. 4.17. Frecvența relativă și absolută a tipurilor de grăunți pentru O 30 UM și O 50 UM [BUI15]

Din figura 4.31 și tabelul tabelul 4.23, se poate concluziona că strategia cu un strat de fabricație mai mic va genera piese cu o densitate mai mare grăunți, deci cu o structură internă mai compactă ceea ce ar trebui să conducă la proprietăți fizico-mecanice mai bune. Conform celor prezentate în capitolul anterior, aceste proprietăți nu depind doar de grosimea stratului dar și de poziționarea piesei pe masa de fabricație, cât și de energia de topire și de timpul de menținere al acestei energii. Din cele prezentate anterior, a reieșit că microduritatea nu diferă semnificativ între cele două strategii de fabricație și atunci se poate alege ca metodă de fabricație cea cu strategia ce folosește un strat mai mare de pulbere deoarece această strategie conduce la o reducere a timpului de fabricație și, implicit, o reducere a costurilor de operare a mașinii.

Tabelul 4.23. Frecvența relativă și absolută a grăunților din O 30 UM vs O 50 UM [BUI15]

O 30 UM				O 50 UM			
Număr total de grăunți	Tip grăunți	Frecvența absolută	Frecvența relativă	Număr total de grăunți	Tip grăunți	Frecvența absolută	Frecvența relativă
total 336	grăunți alungiți	64	0.19	total 214	grăunți alungiți	53	0.25
	grăunți picătura	216	0.64		grăunți picătura	114	0.53
Val medie imagine (84)	grăunți nedefiniți	56	0.17	Val medie imagine (40)	grăunți nedefiniți	47	0.22

Referitor la aria grăunților, din studiul parametrilor statistici ai celor două strategii se poate concluziona, conform tabelului tabelul 4.24, că strategia cu un strat de pulbere de 30 [μm] conduce la fabricarea unor piese cu grăunți ce au valoarea medie a ariei mai mică de cât a strategiei cu un strat de 50[μm]. Tot în acest tabel se poate observa că și abaterea față de medie este mai mică, deci procesul are o variabilitate mai mică în ceea ce privește mărimea grăunților din structura internă. Chiar dacă abaterea față de medie este mai mică, amplitudinea este mai mare. Această amplitudine poate fi generată și de valori aberante (puncte ce pot fi generate de erori de măsurare, erori de aproximare, sau erori ale procesului de fabricație).

În concluzie, deși strategia de fabricație cu strat de 30 [μm] conduce la obținerea unor piese cu o microstructură mai fină, creșterea timpului de fabricație și a costurilor de producție, în cele mai multe cazuri, nu compensează câștigurile legate de proprietățile pieselor. După cum se poate observa și din capitolul anterior, din punct de vedere statistic, microduritatea pieselor obținute prin cele două strategii de fabricație, de 30 [μm] și respectiv 50 [μm], nu diferă semnificativ și atunci este indicat să fie aleasă, ca metodă de fabricație, strategia de 50 [μm] deoarece prin aceasta se obțin piese într-un timp mai scurt, ceea ce are ca efect un cost de operare mai mic și prețuri competitive. Strategia de fabricație de 30 [μm] poate fi utilizată în cazul în care sunt cerințe legate de microstructura internă a pieselor. Capitolul 5. Studii de caz

Tabelul 4.24. Calculul indicatorilor statistici pentru aria grăunților din imaginile aferente pieselor O 30 UM și O 50 UM [BUI15]

O 30 UM		O 50 UM	
Denumire Indicator statistic	Valoare indicatori statistici	Denumire Indicator statistic	Valoare indicatori statistici
Valoarea minimă	54.94 [μm ²]	Valoarea minimă	130.03 [μm ²]
Valoarea maximă	33499.23 [μm ²]	Valoarea maximă	25006.98 [μm ²]
Valoarea medie	3428.41 [μm ²]	Valoarea medie	4762.50 [μm ²]
Valoarea medianei	2300.43 [μm ²]	Valoarea medianei	3511.14 [μm ²]
Valoarea mod	93640.87 [μm ²]	Valoarea mod	65495.95 [μm ²]
Abaterea medie pătratică	3744.71 [μm ²]	Abaterea medie pătratică	4520.55 [μm ²]
Amplitudinea	33444.29 [μm ²]	Amplitudinea	24876.95 [μm ²]
Boltirea - curba ascuțita >0 mai plata ca normala <0	18.42	Boltirea - curba ascuțita >0 mai plata ca normala <0	2.93
Asimetrie dreapta sk>0 asimetrie stânga sk<0(skewness)	3.33	Asimetrie dreapta sk>0 asimetrie stânga sk<0(skewness)	1.53

Capitolul 5. Studii de caz

5.1. Refabricarea produselor industriale

Refabricarea produselor industriale folosind tehnologii inovative, în special tehnologiile aditive, este un domeniu care începe să fie tot mai mult în atenția companiilor producătoare de bunuri materiale, deoarece tehnologia poate fi aplicată pentru orice tip de produs, fie el industrial sau nu. Acest imbold de a refabrica produse este generat de anumite necesități tehnico-economice ce apar în practică (figura 5.1):

- Existența în exploatare a dispozitivelor, utilajelor sau echipamentelor pentru care nu se mai pot procura piese de schimb deoarece:
 - producătorul inițial nu mai există pe piață;
 - modelul de echipament utilizat este scos din fabricație;
 - nu se cunoaște cine este producătorul;
- Echipamentul este importat, iar costul aducerii unei componente de schimb ar fi mult mai mare decât costul de ei de refabricare;
- Echipamentul este importat, costul de import este mai mic decât cel de refabricare, însă timpul necesar livrării componente este foarte mare, ceea ce se traduce în costuri mărite prin oprirea funcționării echipamentului;
- Costul fabricării unei piese noi, prin tehnologiile convenționale, depășește costul refabricării prin tehnologii aditive.

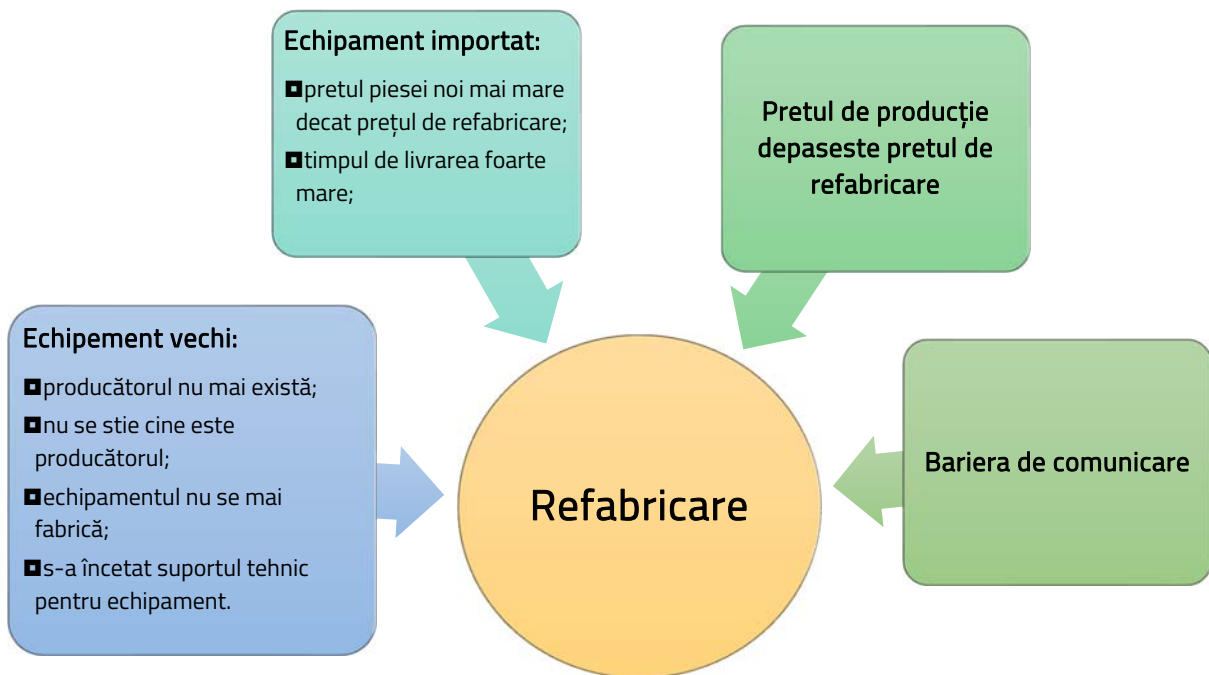


Fig. 5.1. Condiții care favorizează refabricarea produselor

Se poate evidenția faptul că refabricarea produselor este o consecință a unor necesități tehnico-economice, din motive ce țin de timpii de funcționare (ce se pot exprima și prin indicatori economici), din motive legate de comunicare (nu mai există producătorul, bariera de comunicare), dar și prin

necesitatea de readucere la parametri normali de funcționare a dispozitivelor și utilajelor scoase din oferta producătorilor.

Refabricarea pieselor poate fi realizată, în prezent, prin două metode:

- refabricarea prin metode clasice;
- refabricarea prin metode de fabricație aditive.

Refabricarea prin metode clasice presupune implicarea unui personal calificat, cu o experiență vastă în reproiectarea și fabricarea pieselor sau componentelor asemănătoare cu cele care trebuie refabricate. De asemenea, este necesară reproiectarea piesei în medii digitale, și proiectarea unui nou flux tehnologic de fabricație care presupune utilizarea unor mașini unelte și echipamente clasice cu sau fără comandă numerică, de regulă care folosește principiul îndepărtării de material (așchiere). Toate aceste activități presupun costuri mari pentru fabricarea unei singure piese sau a unui număr mic de piese.

În principal, refabricarea prin procedeele aditive presupune faptul că nu există acces la documentația originală de fabricație, dar există acces la piesa care se dorește a fi refabricată. Astfel, având piesa, produsul poate fi reproiectat folosind tehnicile de Inginerie inversă (Reverse Engineering - RE) [ABE94] și, apoi, folosind tehnologiile de fabricație aditivă, piesa poate fi refabricată și asamblată în produsul original.

Tehnicile de Inginerie inversă sunt folosite în multe domenii în care este necesară obținerea rapidă de informații din mediul înconjurător. Printre domeniile în care se folosește această metodă de colectare a datelor se poate aminti : industria aerospațială, industria auto (cu precădere designul auto), industria de încălțăminte, industria textilă, arhitectură (planuri arhitecturale pentru clădiri existente) și unul dintre cele mai importante este medicina, unde se colectează date ce sunt unice pentru fiecare om în parte [RAJ08, OAN13, LEO15a, PES16, COS16, PES17, RUS17, BOR17, MAN18, TUR18].

Ingineria inversă presupune utilizarea de dispozitive speciale ce generează un model digital după geometria reală a unui obiect. Acest model digital poate fi folosit pentru a se fabrica o piesă nouă sau chiar pentru a îmbunătăți modelul existent [DUR10].

Printre dispozitivele de digitizare utilizate în Ingineria inversă se regăsesc echipamentele de radiografiere, tomografiere și RMN, utilizate cu precădere în medicină și scanerele 3D utilizate cu precădere în industrie [LEO15]. Scanerele 3D utilizate pentru digitizarea obiectului se utilizează și după fabricare pentru a efectua un control al calității sau pentru măsurători și certificări ale procesului de fabricație.

Scanerele 3D pot fi clasificate, în funcție de criterii bazate pe funcționare, construcție sau metodă de scanare [TOT14].

În funcție de soluția constructivă ele pot fi staționare sau mobile [TOT14].

Scannerelor 3D în funcție de metoda de scanare pot fi clasificate astfel [TOT14]:

- scanare ce prelevează datele pentru digitizare prin contact direct;
- scanere ce prelevează datele fără contact:
 - optice – funcționează pe principii fotografice;
 - cu laser – funcționează pe principiul triangulației;
 - cu ultrasunete – funcționează pe principiul triangulației;

- cu raze X – cu acest tip de scanner se pot obține și informații legate de geometria internă și a defectelor din material.

Un tip aparte de scanner este cel care utilizează principiul distrugerii obiectului original. Acestea înlătură un strat de material la fiecare trecere, după care realizează o digitizare a rezultatului. Asemănător acestui proces este și scanarea RMN utilizată în medicină, care realizează secțiuni succesive din corp unite la final într-o imagine de ansamblu al întregului corp, însă acest proces este unul nedistructiv.

După digitizare urmează un proces de reproiectare a produsului/obiectului, după care fabricația propriu-zisă a piesei ce poate fi realizată prin metodele tradiționale, utilizând un flux tehnologic format din operații succesive realizate pe mașini tradiționale sau pe mașini din categoria imprimantelor 3D, utilizând, de exemplu, și mașini specifice topirii selective cu laserul (SLM).

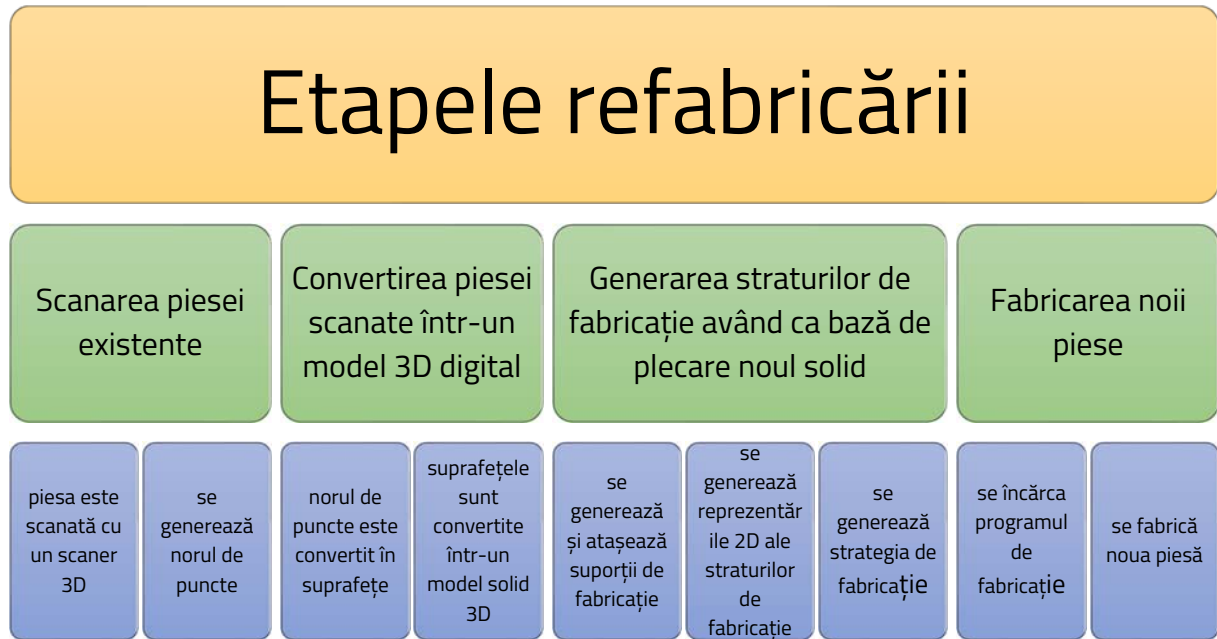


Fig. 5.2. Etapele refabricării produselor [BUI14]

Etapele refabricării

În prezentul capitol, sunt evidențiați pașii urmați pentru a se efectua refabricarea unei piese. Aceștia sunt (Fig.5.2):

- piesa originală este scanată utilizând un scanner 3D, iar rezultatul este un nor de puncte;
- norul de puncte obținut prin scanare este convertit în suprafețe;
- suprafețele sunt apoi transformate într-un model 3D virtual;
- modelul 3D generat este utilizat pentru reproiectarea piesei;
- noul model CAD este folosit pentru generarea fișierului de fabricație aditivă:
 - suportii de fabricație sunt generați și atașați la modelul CAD;
 - cu suportii atașați se utilizează noul model pentru generarea traseelor 2D aferente fiecărui strat de fabricație aditivă;
 - se selectează materialul din care se fabrică piesa finală;
 - se elaborează strategia de fabricație;
- noua piesă se refabrică;

- se măsoară piesa și se compară cu modelul CAD sau cu norul de puncte inițial;
- se testează piesa prin montarea acesteia în ansamblul din care face parte.

În prezentul studiu de caz s-a avut în vedere o roată dințată deteriorată care provine de la o mașină de cusut de colecție, de tip Singer. Piesa îndeplinește condițiile ce conduc, de obicei, la refabricarea pieselor, această mașină de cusut nu se mai fabrică, iar producătorul a încetat să mai producă și să furnizeze piese de schimb (Fig.5.3).

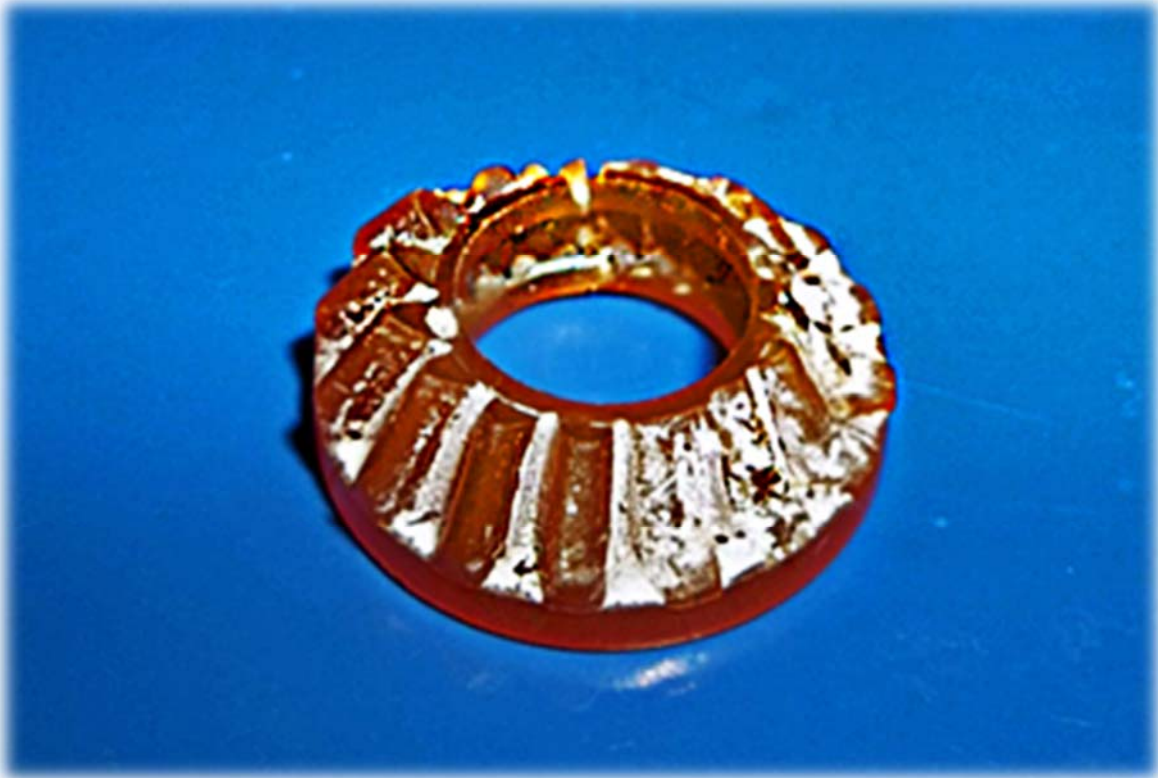


Fig. 5.3. Roata dințată deteriorată aflată în componența unei mașini de cusut Singer

Roata dințată originală care are un diametru exterior de 25 [mm] are o parte din dinți distruși, prin rupere. Piesa originală a fost realizată prin injecție dintr-un plastic dur. Tehnologia de fabricație prin injectare folosește matrițe speciale pentru a se obține piesele. Fără aceste matrițe este dificil să se mai producă roata dințată.

5.1.1. Scanarea 3D cu comet L3D.

Pentru a putea refabrica roata dințată de la mașina de cusut Singer, aceasta trebuie mai întâi digitizată. Acest lucru se realizează utilizând scannerul 3D Comet L3D existent în dotarea Departamentului Ingineria fabricației din cadrul Universității Transilvania din Brașov.

5.1.2. Generarea modelului CAD asociat roții dințate

Norul de puncte obținut a fost folosit pentru a se genera un mesh format din poligoane. Mesh-ul reprezentând, în realitate, o suprafață ce trece prin toate punctele norului, nu este o geometrie 3D finală.

Mesh-ul este exportat în formatul STL, formatul utilizat cel mai des în fabricația aditivă, și apoi încărcat în sistemul software Geomagic Studio.

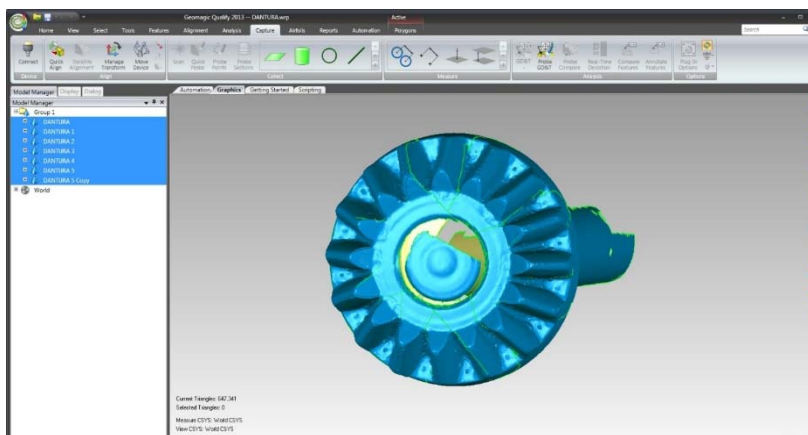


Fig. 5.4. Roată dințată după ce dinții au fost copiați pe un tablou polar

Deoarece roata dințată conține suprafețe de revoluție, se determină axa de rotație, după care, dinții cu geometrie completă, vor fi copiați și roțiți în jurul acestei axe. Acest procedeu a fost efectuat de 5 ori pentru se putea genera roata dințată finală cu toți dinții, fără defecte (figura 5.7.).

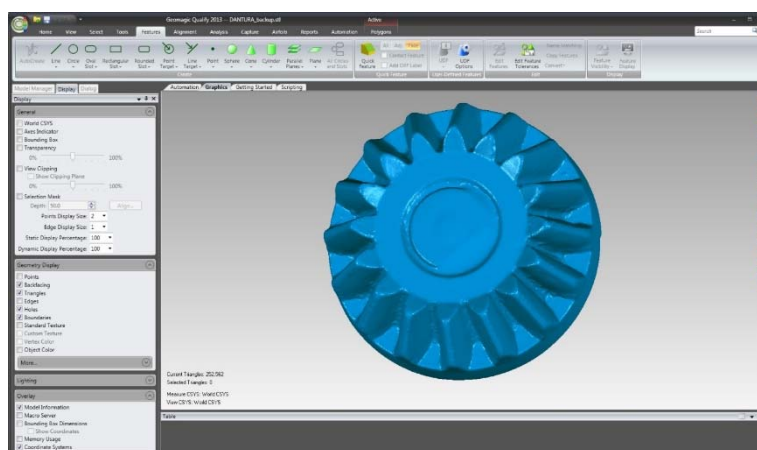


Fig. 5.5. Roată dințată, model 3D final.

Cele 5 mesh-uri obținute în urma copierii și rotirii dinților nedeteriorați au fost apoi utilizate pentru a genera un singur mesh ce conține piesa completă fără defecte. Deoarece axul pe care a fost montată roata dințată nu trebuie refabricat, acesta, împreună cu alte puncte de zgomot ce mai pot apărea în mesh, sunt șterse (figura 5.9).

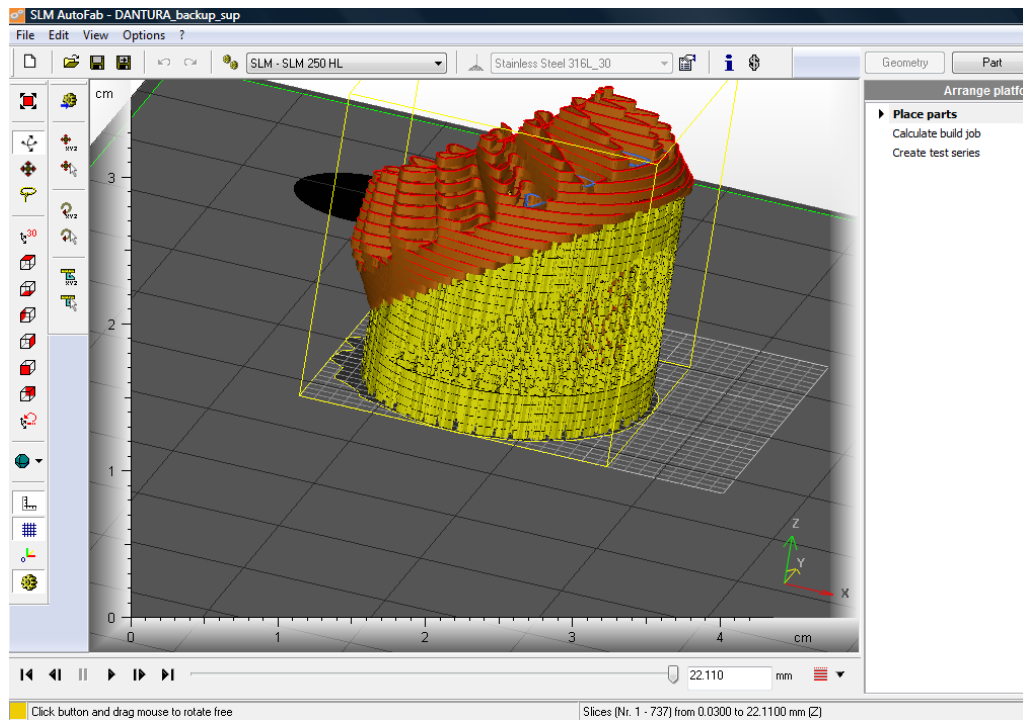


Fig. 5.6. Reprezentare grafică a strategiei de fabricație [BUI14]

5.1.3. Generarea strategiilor de lucru pentru fabricația aditivă

Strategia de fabricație constă în:

- generarea și atașarea la model a suportilor de fabricație;
- stabilirea caracteristicilor materialului de fabricație;
- definirea parametrilor și regimurilor de lucru pentru unitatea laser, camera de fabricație și masa de lucru.

În cercetarea de față s-au ales strategii diferite pentru suportii și pentru corpul principal al piesei. Astfel suportii vor fi construiți cu următorii parametri:

- Conturul exterior al suportilor:
 - puterea laserului: 100W;
 - viteza de scanare: 300 mm/s;
- Centrul suportilor:
 - puterea laserului: 100W;
 - viteza de scanare: 120 mm/s;
- Zona de separație între centru și exterior:
 - puterea laserului: 100W;
 - viteza de scanare: 150 mm/s;
- Piesa va fi fabricată cu următorii parametri:
 - puterea laserului: 100W;
 - viteza de scanare: 150 mm/s;

5.1.4 Fabricarea roții dințate pe echipamentul SLM 250 HL.



Fig. 5.7. Fabricarea roții dințate pe mașina SLM 250 HL – laserul topind un strat



Fig. 5.8. Fabricarea roții dințate pe mașina SLM 250 HL – un strat de fabricație.



Fig. 5.9. Fabricarea roții dințate pe mașina SLM 250 HL – vedere spate piesă finalizată [BUI14]



Fig. 5.10. Fabricarea roții dințate pe mașina SLM 250 HL – vedere față piesă finalizată [BUI14]

5.2. Fabricarea unui molar mandibular și a primului molar utilizând procedeul SLM

În practică, este necesar să se evalueze durata de viață a instrumentelor endodontice NI-TI (HyFlex CM, Coltene) supuse testelor in vitro, de îndoire și rotație, cu și fără mișcări de ciugulire, într-un canal apical cu curburi nonplanare similare cu cele existente într-un dinte real [JER03]. Pentru a se putea realiza această evaluare dinții trebuie fabricați dintr-un material care să reziste la un număr mare de încercări (cicluri) [LOI16]. Materialul ales a fost oțel inox 316L iar dinții sunt fabricați utilizând procedeul de topire selectivă cu laserul.

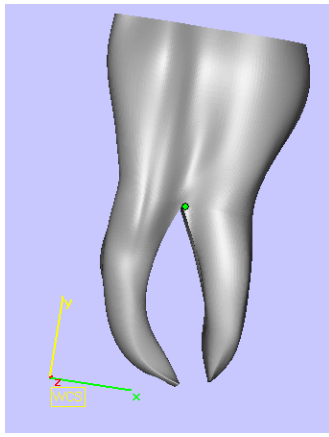


Fig. 5.11. Molar mandibular - vedere 3D [BUI16]

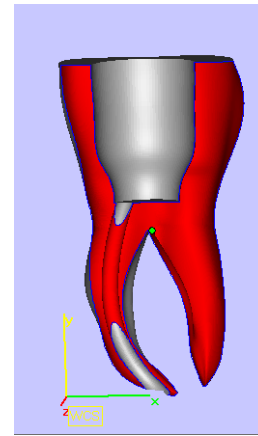


Fig. 5.12. Molar mandibular - secțiune în vedere 3D [BUI16]

Modelul 3D al molarului mandibular a fost realizat în sistemul CAD, SolidWorks. Pentru a se putea modela cu precizie dintel artificial și implicit canalul meziostivular (ce are un diametru de 0,9 mm) [ABE94], s-au utilizat două radiografii ale unui molar mandibular, o radiografie bucolinguală și una mesiodistală, preluate dintr-un studiu al morfologiei molare [JER03, RAJ08].

Tabelul 5.5. Analiza celei de a treia soluții de poziționare.

Denumire zonă	Denumire operație	DA	NU	Punctaj (DA =1, Nu =0)
Suprafața exterioară	Îndepărtare suportți	X		1
	Necesită prelucrare ulterioară		X	0
	Formă complexă		X	1
Canale interioare	Îndepărtare suportți		X	0
	Necesită prelucrare ulterioară		X	0
	Formă complexă	X		1
Suportți exteriori	Nu sunt suficienți		X	0
Suportți interiori	Sunt necesari		X	0
Total punctaj				3
Timp de fabricație (hh:mm:ss)				2:28:29
Număr de straturi				833
Număr persoane implicate				2

5.2.1. Analiza posibilităților de poziționare a Molarului mandibular

În cazul luat în studiu, s-au luat spre analiză trei soluții pentru poziționarea dintelui pe masa de lucru:

- Molarul mandibular așezat paralel cu masa de lucru;
- Molarul mandibular așezat cu rădăcina paralelă cu masa de lucru;
- Molarul mandibular așezat cu coroana paralelă cu masa de lucru.

În urma analizei acestei soluții de poziționare s-a întocmit tabelul 5.5. Din punctul de vedere al rezultatului final, s-a obținut cel mai mic punctaj (3 puncte). Însă ca timp de fabricație și număr de straturi rezultă o valoare medie.

Se poate concluziona ca aceasta este soluția de fabricație cea mai bună, deoarece conduce la un compromis între rezultatul final, consumul de material, timpul de fabricație și numărul de straturi de fabricație.

5.2.2. Analiza posibilităților de poziționare a primul premolar

La fel ca și molarul mandibular, primul premolar a fost modelat 3D utilizând SolidWorks, plecând de la două radiografii, o radiografie bucolinguală și una mesiodistală, preluate dintr-un studiu al morfologiei molare [RAJ08, JER03].

Primul pas în fabricația primului premolar este gerarea și atașarea suportilor de fabricație împreună cu alegerea soluției de poziționare în raport cu masa mașinii. Și pentru acest caz s-au luat în considerare trei metode de poziționare:

- așezat paralel cu masa de fabricație;
- așezat cu rădăcina paralelă cu masa de fabricație;
- poziționat cu coroana paralelă cu masa de fabricație.

Fiecare dintre cele trei soluții de poziționare sunt analizate și cea mai bună va fi selectată ca soluție constructivă pentru acest dinte.

Soluția 3. Primul premolar așezat cu coroana paralelă cu masa de fabricație

Ultimă metodă de poziționare încercată pentru acest caz, este așezarea primului premolar mandibular paralel cu masa de lucru. În această poziție, suportii sunt atașați pe coroana dintelui (figurile 5.60, 5.61, 5.65 și 5.66), care poate fi considerată a fi plană, deci oferă o suprafață suficient de extinsă pentru fixarea cu succes a dintelui în timpul procesului de fabricație. De asemenea se pot atașa și suportii în interiorul molarului, unde din nou este o suprafață plană.

Zona de fixare, sau mai bine zis, granița dintre suportii și piesă este materializată de o suprafață aproximativ plană, ceea ce înseamnă ca este foarte ușor de îndepărtat după fabricația propriu-zisă. După cum se poate observa în figura 5.62, suportii atașați sunt de tip bloc de formă cilindrică.



Fig. 5.13. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare.
Vedere izometrică

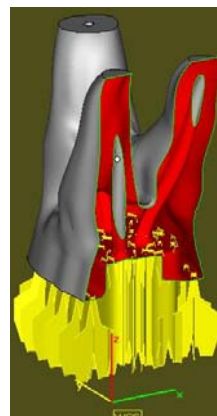


Fig. 5.14. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare.
Vedere izometrică – secțiune

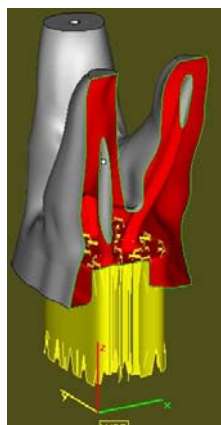


Fig. 5.15. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare. Vedere izometrică – secțiune, suportți interiori.



Fig. 5.16. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare. Vedere izometrică – secțiune, suportți exteriori

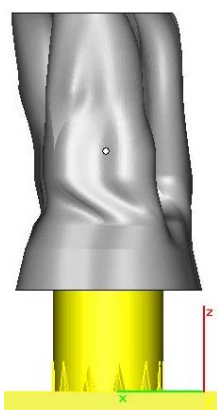


Fig. 5.17. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare. Vedere lateral – suportți interiori

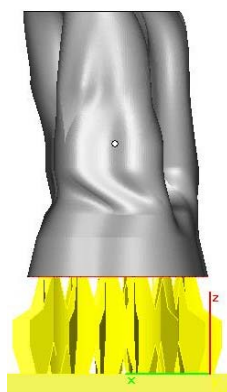


Fig. 5.18. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare. Vedere lateral – suportți exteriori

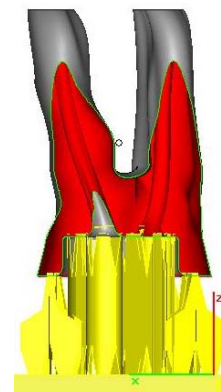


Fig. 5.19. Primul premolar. Soluția 3 de poziționare. Vedere lateral – secțiune, suportți exteriori și interiori

În urma analizei acestei soluții de poziționare se obțin datele din tabelul 5.8.

Din punctul de vedere al rezultatului final s-a obținut cel mai mic punctaj (3 puncte). Însă ca timp de fabricație și număr de straturi s-a obținut cea mai mare valoare.

Tabelul 5.8. Analiza celei de a treia soluții de poziționare.

Denumire zonă	Denumire operație	DA	NU	Punctaj (DA =1, Nu =0)
Suprafața exterioară	Îndepărtare suportți	X		1
	Necesită prelucrare ulterioară	X		1
	Formă complexă		X	
Canale interioare	Îndepărtare suportți		X	0
	Necesită prelucrare ulterioară		X	0
	Formă complexă	X		1
Suportți exteriori	Nu sunt suficienți		X	0
Suportți interiori	Sunt necesari		X	0
Total punctaj				3
Timp de fabricație (h)				1:50:14
Număr de straturi				617
Număr persoane implicate				1

Se poate observa ca timpul de fabricație are cea mai mare valoare dintre cele trei soluții de poziționare, însă diferențele sunt de ordinul minutelor (cea mai mare diferență fiind de 6 minute între cea mai rapidă soluție și soluția aleasă), de aceea acest aspect poate fi neglijat. Aceleași considerații pot fi luate în considerare și pentru numărul de straturi.

Concluzia ce rezultă din aceste analize este că, cea de-a treia soluție de fabricație este cea mai bună, deoarece, face compromisul între rezultatul final, consumul de material, timpul de fabricație și numărul de straturi de lucru necesare.

5.2.3. Stabilirea strategiei de fabricație și a parametrilor de lucru

Odată stabilită soluția de poziționare pentru piese, modele 3D cu suportii sunt importate în Autofab pentru a se putea genera strategia de fabricație, inclusiv parametrii de lucru.

Atât în cazul molarului mandibular cât și în al primului premolar se folosește strategia de lucru "Hull (thin_walled_parts) - Stripes with skin", cu un strat de 30 [μm]. S-a folosit această strategie deoarece dintele cu canalul interior poate fi comparat cu o piesă care are pereți subțiri.

Parametrii de lucru utilizați în procesul de fabricație sunt:

1. Pentru zona de margine (figura 5.67):
 - Viteza de scanare: 565 mm/s;
 - Puterea laserului: 100W.
2. Pentru zona de volum (figura 5.68):
 - Viteza de scanare : 750 mm/s;
 - Puterea laserului: 175W.
3. Pentru zona de trecere dintre zona de volum și zona de margine(figura 5.69):
 - Viteza : 750 mm/s;
 - Puterea laserului: 175W.
4. Pentru conturul exterior (figura 5.70):
 - Viteza :550 mm/s;
 - Puterea laserului: 175W.



Fig. 5.20. Vedere din față molar mandibular atașat de masa de lucru. [BUI16]



Fig. 5.21. Vedere din lateral molar mandibular atașat de masa de lucru. [BUI16]

5.2.4. Fabricarea molarului mandibular și a primului premolar pe mașina SLM 250-HL



Fig. 5.22. Vedere din față molar mandibular desprins de masa de lucru.



Fig. 5.23. Vedere de sus molar mandibular desprins de masa de lucru. [BUI ~16]



Fig. 5.24. Vedere din față molar mandibular cu suportii de fabricație înlăturați, fără suprafață prelucrată. [BUI16]



Fig. 5.25. Vedere din față primul premolar atașat de masa de lucru.



Fig. 5.26. Vedere din lateral primul premolar atașat de masa de lucru.



Fig. 5.27. Vedere din față primul premolar desprins de masa de lucru.



Fig. 5.28. Vedere de sus primul premolar desprins de masa de lucru.



Fig. 5.29. Vedere din față primul premolar, fără suprafață prelucrată.

5.3. Concluzii

În urma cercetărilor întreprinse, se poate concluziona că refabricarea pieselor deteriorate este posibilă prin utilizarea a mai multor tehnici și procese din sfera digitală: digitizarea produsului existent, reproiectarea și apoi fabricarea aditivă a acestuia.

Digitizarea produsului este un pas important fără de care refabricarea nu ar fi posibilă. Cum această tehnică evoluează, se miniaturizează din ce în ce mai mult, în viitor se vor folosi dispozitive precum un simplu telefon mobil pentru a se realiza acest lucru (în acest moment există pe piață sisteme software ce pot reconstrui un obiect 3D folosind un set de fotografii prelevate cu un telefon mobil). De asemenea rezoluția acestor dispozitive va crește și, drept urmare, și calitate norului de puncte și a modelului 3D obținut.

Reproiectarea este un pas în care, inginerii pot interveni pentru a îmbunătăți piesa originală. Acest lucru se realizează prin reproiectarea anumitor zone ale piesei sau o reproiectare completă, plecând de la modelul digital.

Calitatea obiectului fabricat utilizând procedee aditive este strâns legată de precizia dispozitivului de digitizare dar și de procesul de reproiectare. Piesa poate fi reprodusă, modificată și realizată în toate configurațiile posibile și orice în cantitate. Pentru realizarea acestui lucru sunt necesare: o anumită cantitate de pulbere din materialul dorit și fișierele cu modelele 3D.

Această modalitate de refabricare a produselor poate avea un impact major asupra felului în care se realizează suportul tehnic și garanția anumitor echipamente. În viitor, e posibil ca, tot ce este necesar pentru întreținerea unui echipament (piese de schimb) va fi digitalizat și furnizat clientului pe un suport de stocare a datelor, urmând ca acesta să poată obține, la nevoie, orice piesă de schimb într-un interval de timp scurt și în cantitatea dorită, putând să aducă chiar și îmbunătățiri, prin modificarea formei sau a materialului.

În fabricația aditivă se regăsesc mai multe etape importante: preprocesarea, generarea strategiei de fabricație, fabricația aditivă propriu-zisă și postprocesarea.

Aceste etape nu sunt separate ci interconectate, o modificare în una dintre ele conduce la modificări în toate celelalte după cum s-a putut observa și în prezenta lucrare. Nu se poate preciza că o etapă e mai importantă decât celelalte deoarece, o eroare produsă în oricare dintre aceste etape poate conduce la un rezultat nedorit, și anume rebutarea piesei.

Piese ce au ca model inițial o structură organică (de exemplu dinți) nu pot fi fabricate prin tehnologiile și metodele convenționale datorită diferențelor dintre ele. Aceste particularități fac ca acest tip de obiecte/piese să poată fi fabricate prin metodele de fabricație aditivă.

După cum s-a subliniat și în prezenta lucrare și în utilizarea metodelor aditive de fabricație, se întâmpină dificultăți în fabricarea acestor piese, fiecare proces de fabricație, necesitând un studiu amănunțit pentru identificarea de fabricație. Din aceste soluții fac parte poziționările pieselor față de masa de lucru, tipul și numărul de suporturi de lucru, poziționarea suporturilor de lucru și, nu în ultimul rând, parametrii de lucru aleși (putere laser, viteză de scanare, grosime strat).

Datorită multitudinii de parametri, ce definesc fabricația aditivă a pieselor de tip unicat (inclusiv cele organice), procesul de fabricație este diferit de la o piesă la alta. În viitor, se preconizează, că vor fi elaborate principii generale, pentru fabricarea acestor structuri, principii care vor conduce la reducerea timpului de analiză și fabricație.

Primul studiu de caz a prezentat refabricarea unei roți dințate deteriorate de la o mașină de cusut Singer. Roata dințată originală, realizată din material plastic, a fost digitizată, reproiectată (sau înlocuit dinții deteriorați) și refabricată, din oțel inox, prin procedeul de topire selectivă cu laserul, după care a fost montată pe mașina de cusut Singer [BUI14].

Ce de-al doilea studiu de caz a avut ca finalitatea fabricarea unor replici la scara 1:1 pentru un molar mandibular și pentru primul premolar. Aceste două replici au fost apoi utilizate pentru construcția unui banc de probă pentru încercări accelerate ale instrumentelor endodontice [JER03].

Metodele de fabricație aditivă permit fabricarea pieselor cu complexitate mare (piese cu canale de răcire internă, piese goale pe interior, piese cu structură "wireframe" și piese ce copiază sisteme biologice), pentru unele dintre ele fiind singura soluție de fabricație. În viitor evoluția tehnologiilor și a metodelor de fabricație aditivă va conduce la reducerea timpului de fabricație, la simplificarea procesului de fabricație și la îmbunătățirea proprietăților pieselor obținute.

Capitolul 6. Concluzii finale. Contribuții personale. Diseminarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare.

6.1. Concluzii finale

Lucrarea cu titlul *“Cercetări privind fabricarea prin topire selectivă cu laserul a pieselor din oțel inox 316 L”* este structurată în 6 capitole. Primul capitol este dedicat studiului stadiului actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive, cu accent pe fabricarea pieselor din materiale metalice.

În cel de-al doilea capitol sunt prezentate obiectivele investigațiilor științifice.

Capitolul trei conține contribuțiile autorului în cadrul tezei de doctorat, în direcția determinării microdurității pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul din oțel inox 316 L și se evidențiază influența pe care mărimea stratului de pulbere și poziționarea pieselor o are asupra microdurității și a timpilor de fabricație.

În capitolul patru este elaborată și aplicată o metodologie de analiză cantitativă și calitativă a microstructurii pieselor obținute prin topirea selectivă cu laserul din oțel inox 316 L, în funcție de grosimea stratului de pulbere.

Al cincilea capitol cuprinde două studii de caz, unul privind reproiectarea și refabricarea, din oțel inox 316L, a unei roți dințate deteriorate pentru care nu mai există documentație tehnică și, al doilea privind replicarea unui molar mandibular și a unui premolar în vederea integrării și utilizării lor într-un stand destinat testării la oboseală a instrumentelor dentare.

Ultimul capitol conține concluziile generale, contribuțiile personale ale autorului precum și dezvoltările viitoare.

Concluziile generale rezultate în urma studierii literaturii de specialitate și a desfășurării, de către autor, a cercetărilor teoretice și experimentale sunt următoarele:

- Domeniul fabricației aditive este în plină dezvoltare, după aproape 60 de ani de inovații directe, în domeniu sau în domenii conexe;
- Datorită inovațiilor, dar și a cercetărilor întreprinse, există o serie de procedee de fabricație aditivă, printre acestea se pot aminti:
 - Stereolitografierea (Stereolithography - SLA);
 - Depunerea de material topit (Fused Deposition Modeling – FDM);
 - Fabricarea de piese stratificate din foi laminate (Laminated Object Manufacturing - LOM);
 - Sinterizare selectivă cu laser (Selective Laser Sintering - SLS);
 - Topirea selectivă cu laser (Selective Laser melting - SLM);
- Fiecare dintre procedeele prezentate răspund anumitor cerințe. Acestea, împreună cu materialele aferente au trebuit adoptate pentru a putea fi folosite, în tandem, cu noile tehnologii de obținere a materialelor (materia prima este pulberea, firul sau foaia de material) și a tehnicii de calcul care este în plină evoluție. Cercetările ample din domeniu, pe plan mondial, se reflectă direct în avantajele oferite de tehnologiile aditive în diversele domenii în care acestea sunt aplicate;

- Deocamdată, până la inventarea unor alte metode de fabricație aditive, cercetările sunt direcționate către optimizarea și îmbunătățirea metodelor actuale de fabricație aditivă, dar și în extinderea gamei de materiale utilizate;
- Marele avantaj al fabricației aditive constă în utilizarea modelelor 3D pentru fabricarea obiectelor fără a folosi scule și mașini complexe, fiind restrânsă utilizarea metodelor tradiționale care implică personal cu înaltă calificare și o multitudine de echipamente;
- În prezent tehnologiile aditive nu pun la dispoziție aceeași gamă de materiale ca și metodele tradiționale de fabricație. Trebuie găsite noi materiale și aliaje care pot fi folosite în fabricația aditivă care să poată extinde proprietățile și utilitatea produselor obținute prin această tehnologie;
- Dezvoltarea și utilizarea de noi materiale conduce la nevoia definirii de parametri de lucru pentru aceste materiale;
- Microstructura pieselor obținute prin fabricație aditivă este direct influențată de parametrii de lucru;
- Conceptul și metodologia de fabricație aditivă permit îmbunătățirea și redefinirea conceptului de service și suport oferit post vânzare pentru toate echipamentele.

6.2. Contribuții personale

Pe baza obiectivelor stabilite în capitolul 2 al tezei de doctorat și având în vedere cercetările teoretice și experimentale desfășurate în perioada stagiului de doctorat, se poate aprecia că, autorul și-a adus, în domeniul temei, următoarele contribuții personale:

- a) elaborarea unei sinteze asupra stadiului actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive în general, și a procedurii de topire selectivă cu laserul în special, reflectat în brevete acordate pe plan internațional, în literatura de specialitate și evoluția pe piață a procedurilor și tehnologiilor aditive (Capitolul 2);
- b) determinarea microdurității interne Vickers a unor piese, de forme diferite, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, din oțel inox 316 L, și analiza statistică a datelor obținute (Capitolul 3, § 3.1.1-3.1.4)
- c) evidențierea influenței pe care o au asupra timpilor de fabricație și a microdurității, poziția pieselor relativ la masa de fabricație (cu stratul de fabricație paralel și la un unghi de 45° față de masa mașinii) și mărimea stratului de lucru, 30 [μm] sau 50 [μm] (Capitolul 3, § 3.1.5-3.1.9);
- d) elaborarea unei metodologii de analiza cantitativă și calitativă a modificării microstructurii pieselor fabricate prin topire selectivă cu laserul, din oțel inox 316 L, în cazul utilizării a două mărimi ale stratului de lucru, 30[μm] și 50[μm] (Capitolul 4);
- e) evidențierea influenței pe care o are asupra microstructurii interne, poziția piesei relativ la masa de fabricație (cu stratul de fabricație paralel sau la un unghi de 45°) și mărimea stratului de lucru, 30 [μm] sau 50 [μm] (Capitolul 4);
- f) elaborarea unui studiu de caz privind reproiectarea și refabricarea, din oțel inox 316 L, a unei roți dințate deteriorate pentru care nu mai există documentație tehnică, din componența unei mașini de cusut, de colecție, de tip Singer, utilizând tehnica de reverse engineering și procedeul de fabricație aditivă, topirea selectivă cu laserul (Capitolul 5, § 5.1);
- g) elaborarea unui studiu de caz fabricarea din oțel inox 316 L, a unui molar mandibular și a unui premolar care respectă toate caracteristicile naturale ale structurilor anatomice

corespunzătoare, în vederea utilizării lor în procesul de testare și determinare a fiabilității instrumentelor dentare (Capitolul 5, § 5.2).

6.3. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute în urma cercetărilor desfășurate, au permis elaborarea unui număr de *cinci lucrări* ([BUI14, BUI15, BUI15b, LOI16, BUI17]) care au fost prezentate la conferințe internaționale. *La patru* dintre acestea autorul tezei de doctorat este prim autor și autor corespondent, iar din cele *cinci lucrări două sunt indexate ISI-WoS-CPCI* ([LOI16] și [BUI17]) iar trei sunt indexate în alte baze de date internaționale.

Lucrările elaborate în perioada stagiului doctoral au fost citate, de mai multe ori, de autori ai unor lucrări indexate în jurnale ISI (inclusiv din zona roșie - Q1) sau lucrări indexate în baze de date internaționale. Se pot evidenția următoarele citări:

- Lucrarea [BUI15b] citată în Lewandowski, J.J., Seifi, M., Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties (2016), **Annual Review of Materials Research**, 46, pp. 151-186, **FI 13,432**;
- Lucrarea [BUI15] citată în Rubenchik, A.M., King, W.E., Wu, S.S., Scaling laws for the additive manufacturing, (2018), **Journal of Materials Processing Technology**, 257, pp. 234-243, **FI 3.147**.
- Lucrarea [BUI17] citată în Anderson, J., Wealleans, J., Ray, J., Endodontic Applications of 3D Printing, (2018), **International Endodontic Journal**. 51(9), pp. 1005-1018, **FI 3.015**

De menționat este și faptul că, doctorandul a participat și la Conferința „Diaspora în Cercetarea Științifică și Învățământul Superior din România - Diaspora și prietenii săi” la Timișoara, în anul 2016, în cadrul Workshop-ului: Cercetare și inovare în ingineria fabricației. Oportunități pentru comunitatea științifică românească- Tehnologiile AM/3D Printing, direcții noi de dezvoltare a tehnologiilor AM și aplicațiilor lor.

În perioada anterioară stagiului de doctorat, au fost publicate, alte patru lucrări, două în calitate de prim autor și două în calitate de coautor ([BUI07, BUI07b, ZAH07, ZAH07b]).

6.4. Direcții viitoare de cercetare

În urma desfășurării cercetărilor în cadrul stagiului de doctorat, se poate aprecia că rezultatele obținute pot sta la baza unor cercetări ulterioare în direcția îmbunătățirii și optimizării parametrilor de lucru și a strategiilor de fabricație, pentru diverse materiale.

O alta direcție de cercetare posibilă se referă la elaborarea unei metodologii de stabilire a parametrilor de lucru pentru procedeul de topire selectivă cu laserul, având în vedere noi materiale (de tip pulbere) care apar pe piață.

Tot în cazul procedeului de topire selectivă cu laserul, din punctul de vedere al proprietăților fizico-mecanice se pot desfășura cercetări în direcția studierii influenței mărimii stratului și a poziționării piesei pe masa mașinii, asupra: rezistenței la rupere și la torsiune, rezistenței la oboseală, precum și a altor proprietăți. De asemenea, cercetarea influenței tratamentului termic din etapa de postprocesare asupra proprietăților fizico-mecanice dar și asupra microstructurii, poate fi o altă direcție de cercetare.

Metodologia utilizată pentru refabricarea pieselor poate fi adaptată pentru reducerea costurilor de întreținere și service a echipamentelor și mașinilor utilizate de diverse companii industriale.

7. BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [ABE94] Abella, R.J., Daschbach, J.M., McNichols, R.J., (1994). *Reverse engineering industrial applications*, Computers and Industrial Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 381–385;
- [AHM16] Ahmadi, A., Mirzaeifar, R., Moghaddam, N.S., Turabi, A.S., Karaca, H.E., Elahinia, M.H., (2016). *Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: a computational framework*, Materials & Design, Vol. 112, pp. 328-338;
- [AHM16b] Ahmadi, A., Moghaddam, N.S., Elahinia, M.H., Karaca, H.E., Mirzaeifar, R., (2016). *Finite Element Modeling of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel Parts for Evaluating the Mechanical Properties*, ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Vol. 2 Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing,
- [ALI18] Ali, H., Ghadbeigi, H., Mumtaz, K., *Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 712, pp 175-187;
- [ALR14] Alrbaey, K., Wimpenny, D., Tosi, R., Manning, W., and Moroz, A., (2014). *On Optimization of Surface Roughness of Selective Laser Melted Stainless Steel Parts: A Statistical Study*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 23, No. 6, pp. 2139–2148;
- [AVE11] Averyanova, M., Bertranda, P., Verquin, B., (2011). *Manufacture of Co-Cr dental crowns and bridges by selective laser Melting technology*, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 6, No. 3, pp. 179-185;
- [AST 97] ASTM International, (1997). *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*, ASTM-E92-820, ASTM International;
- [AST10] ASTM International, (2010). *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, ASTM-E384-10, ASTM International;
- [AST15] ASTM International, (2015). *Standard Test Method for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, ASTM E18 - 15, ASTM International;
- [BAL10] Balc, N.O., Berce, P., Pacurar, R., (2010). *Comparison between SLM and SLS in producing complex metal parts*, Annals of DAAAM for 2010 and Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Vol.21, No. 1, pp. 7 -8;
- [BOR16] Borzan, C.S.M., Dudescu, M.C., Ceclan, V., TRIF, A., Ridzon, M., Berce, P., (2016). *PA 2200 vs. PMMA: Comparison Between the Mechanical Properties Obtained for the 2 Biocompatible Materials*, Materiale Plastice, vol. 53, No. 1, pp. 1-5;
- [BOR16a] Borzan, C.S.M., Dudescu, M.C., Berce, P., (2016). *Bending and compression tests for PA 2200 parts obtained using Selective Laser Sintering method*, MATEC Web of Conferences - CoSME'16, Vol. 94, 03010.

- [BOR17] Borzan, C.S.M., Sabau, E., Mera, M., Berce, P., (2017). *Research Regarding the Manufacturing through AM Technologies of an Implant for Cervical Disc Replacement*, MATEC Web of Conferences - MTeM – AMaTUC, Vol. 137, 02008;
- [BOU90] Bourell, D.L., Marcus, H.L., Barlow, J.W., Beaman, J. J., Deckard, C. R., (1990). *Multiple material systems for selective beam sintering*, United States Patent No. 4944817;
- [BOU09] Bourell, D.L., Beaman, J.J., Leub, M.C., Rosenc, D.W., (2009). *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*, RapidTech 2009: US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies, pp. 1-6;
- [BRA12] Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., Buchbinder, D., (2012). *Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior*, Materials and Design, Vol. 34, pp. 159–169;
- [BRI10] Brinksmeier, E., Levy, G., Meyer, D., Spierings, A.B., (2010). *Surface integrity of selective-laser-melted components*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 1, pp. 601–606;
- [BUC11] Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiner, S. W., Bültmann, J., (2011). *High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts*, Physics Procedia, Vol. 12, No. A, pp. 271–278;
- [BUI07] **Buican, G.R., Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2007). *Simulation of Reliability parameters using the Monte Carlo Method*, Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Vol. 1, pp. 17-21;**
- [BUI07b] **Buican, G.R., Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2007). *Study about Reliability life testing and types of data*, Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Vol. 1, pp. 21-26;**
- [BUI14] **Buican, G.R., Oancea, G., Manolescu, A., (2014). *Remanufacturing of Damaged Parts Using Selective Laser Melting Technology*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 693, pp. 285-290;**
- [BUI15] **Buican, G.R., Oancea, G., Lancea, C., Pop, M.A., (2015). *Influence of Layer Thickness on Internal Structure of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*, Applied Mechanics and Materials, zvol. 809-810, pp. 369-374;**
- [BUI15b] **Buican, G.R., Oancea, G., Lancea, C., Pop, M.A., (2015). *Considerations Regarding Micro Hardness of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 760, pp. 515-520;**
- [BUI16] **Buican, G.R., Oancea, G., Rui, F. M., (2017). *Study on SLM manufacturing of teeth used for dental tools testing*, MATEC Web Conf., The 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 - CoSME'16, Vol. 94, pp. 1-10;;**
- [CAR16] Carl Zeiss Optotechnik GmbH, (2016). *Comet I3D - Tehnical Data sheet*;
- [CHI05] Childs, T.H.C., Hauser, C., Badrossamay, M., (2005). *Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modeling*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 219, No. B, pp. 339–357;

- [CHI10] Chivel, Y., Smurov, I., (2010). *On-line temperature monitoring in selective laser sintering-melting*, Physics Procedia, Vol.. 5, No. B, pp. 515–521;
- [CIO12] Ciobota, N.D., (2012). *Standard tessellation language in rapid prototyping technology*, The Scientific Bulletin of VALAHIA University – MATERIALS and MECHANICS. Vol.7,(year 10);
- [CON11] Contuzzi, N., Campanelli, S.L., Ludovico, A.D., (2011). *3D Finite element analysis in the selective laser melting process*, International Journal of Simulation Modelling Vol. 10, no. 3, pp. 113-121;
- [COS16] Cosma, C., Balc, N., Berce, P., Popan, A., Cosma, A., Burde, A., (2016). *Direct manufacturing of customized implants from biometals, by 3d printing*, Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, Vol. 61, No.3 , pp. 369-378;
- [COS18] Cosma, C., Moldovan, C., Campcell, I., Cosma, A., Balc, N., (2016). *Theoretical analysis and practical case studies of powder-based additive manufacturing*, Academic Journal Of Manufacturing Engineering, Vol. 15, No.4, pp. 42-49;
- [CRA10] Craeghs, T.,Bechmann, F., Berumen, S., Kruth, J.P., (2010). *Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors*, Physics Procedia, Vol. 5, no. Part B, pp. 505–514;
- [DI12] Di, W., Yongqiang, Y., Xubin, S., Yonghua, C., (2012). *Study on energy input and its influences on single track, multi-track and multi-layer in SLM*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 9-12, pp. 1189–1199.
- [DIE14] Dieder, S., (2014). *A heuristic algorithm for determining the part set in a powder-bed additive manufacturing machine*, PhD. Thesis, University of Louisville.
- [DIM74] DiMatteo, P.L., (1974). *Method of generating and constructing three-dimensional bodies*, United States Patent No. 3932923;
- [DOU15] Doubenskaia, M.A., Zhirnov, I.V., Teleshevskiy, V.I., Bertrand, P., Smurov, I.Y., (2015). *Determination of true temperature in selective laser melting of metal powder using infrared camera*, Materials Science Forum, Vol. 834, pp. 93-102;
- [DUR10] Durupt, A., Remy, S., Ducellier, G., (2010). *KBRE: A Knowledge Based Reverse Engineering for Mechanical Components*, Computer-Aided Design & Applications, Vol.7, No.2, pp. 279-289;
- [EMM11] Emmelmanna, C., Sanderb, P., Kranzc, J., Wyciska, E., (2011). *Laser Additive Manufacturing and Bionics Redefining Lightweight Design*, Physics Procedia, Vol. 12, No. Part A, pp. 364–368;
- [EMM11a] Emmelmanna, C., Scheinemannb, P., Munscha, M., Seydac, V., (2011). *Laser Additive Manufacturing of Modified Implant Surfaces with Osseointegrative Characteristics*, Physics Procedia, Vol.12, No. Parta A, pp. 375–384;
- [FER12] Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E., Stamp, R., Sutcliffe, C.J., (2012). *Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, No. 2, pp. 355– 364;

- [GEB10] Gebhardt, A., Schmidt, F.M., Hötter, J.S., H., Sokalla, W., Sokalla, P., (2010). *Additive Manufacturing by Selective Laser Melting The Realizer Desktop Machine and its application for the Dental Industry*, Physics Procedia, Vol. 5, No. Part B, pp. 543–549;
- [GOR11] Gorny, B., Niendorf, T., Lackmann, J., Thoene, M., Troester, T., Maier, H.J., (2011). *In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting*, Materials Science and Engineering, Vol. 528, No. 27, pp. 7962– 7967;
- [GU10] Gu, D., Meiners, W., (2010). *Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting*, Materials Science and Engineering:A, Vol. 527, No. 29–30, pp. 7585–7592;
- [GU12] Gu, D., Himg, C., Meng, G., (2012). *Densification, Microstructure, and Wear Property of In Situ Titanium Nitride-Reinforced Titanium Silicide Matrix Composites Prepared by a Novel Selective Laser Melting Process*, Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 43, No.2, pp. 697-708;
- [GUS10] Gusarov, A.V., Smurov, I., (2010). *Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting*, Physics Procedia, Vol. 5, No. Part B, pp. 381–394;
- [HAG10] Hagedorn, Y.C., Wilkes, J., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R., (2010). *Net Shaped High Performance Oxide Ceramic Parts by Selective*, Physics Procedia, Vol.5, No. Part B, pp. 587–594;
- [HAN15] Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T., Kroupa, T., (2015). *The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts*, Procedia Engineering, Vol. 100, pp. 1405-1413;
- [HAS11] Hasan, R., Mines, R., Fox, P., (2011). *Characterization of selectively laser melted Ti-6Al-4V microlattice struts*, Procedia Engineering, Vol. 10, pp. 536–541;
- [HER11] Herrmann, K., (2011). *Hardness Testing: Principles and Applications*, ASM International;
- [ISO15] International Standard, (2015). *Metallic Materials - Rockwell Hardness Test*, ISO 6508, Parts 1 to 3, International Organization for Standardization;
- [ISO152] International Standard, (2015). *Additive manufacturing - General principles - Terminology*, ISO/ASTM 52900, International Organization for Standardization;
- [JER03] Jerome, C.E., Hanlon, R.J., (2003). *Identifying Multiplanar Root Canal Curvatures Using Stainless-Steel Instruments*, Journal of Endodontics, Vol.29, No.5, pp. 356-358;
- [KAL14] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., (2014). *Manufacturing engineering and technology, 6ht edition*, Chpater 20, pp.525-553, Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey;
- [KEC02] Kececioglu, D., (2002). *Reliability & Life Testing Handbook. Volume 1*, DEStech Publications Inc.;
- [KHA10] Khan, M., Dickens, P., (2010). *Selective Laser Melting (SLM) of pure gold*, Gold Bulletin, Vol. 43, No 2, pp. 114-121;

- [LEO15] Leordean, D., Radu, S. A., Frățilă, D., Berce P., (2015). *Studies on design of customized orthopedic endoprotheses of titanium alloy manufactured by SLM*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 79, No. 5-8, pp.905-920
- [LEO15a] Leordean, D., Dudescu, C, Marcu, t., Berce P., Balc, N. (2015). *Customized implants with specific properties, made by selective laser melting*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, no. 1, pp. 98-104;
- [LI10] Li, R., Shi, Y., Wang, Z., Wang, L., Liu, J., Jiang, W., (2010). *Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting*, Applied Surface Science, Vol. 256, No. 13, pp. 4350–4356;
- [LI10b] Li, R., Shi, Y., Liu, J., Xie, Z., Wang, Z., (2010). *Selective laser melting W-10 wt.% Cu composite powders*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 48, No. 5-8, pp. 597–605;
- [LOI16] Loios, G., Martins, R.F., Ginjeira, A., Dragoi, M.V., Buican, G.R., (2016). *Fatigue resistance of rotary endodontic files submitted to axial motion in multiplanar canals manufactured by 3D printing*, XVIII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM XVIII), Procedia Engineering, Vol.160 , pp. 117 - 122;
- [LOT11] Lott, P., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach K., Hinke, C., Bültmann, J., (2011). *Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM)*, Physics Procedia, Vol. 12, No. Part A, pp. 683–690;
- [LOU11] Louvis, E., Fox, P., Sutcliffe, C.J., (2011). *Selective laser melting of aluminium components*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, No. 2, pp. 275–284;
- [MAN18] Manea, A., Bran, S., Baciut, M., Armeanca, G., Pop, D., Berce, P., Vodnar, D.C., Hedesiu, M., Dinu, C., Petrutiu, A., Tomina, D., Baciut, G., (2018). *Sterilization protocol for porous dental implants made by selective laser melting*, Clujul Medical, Vol. 91, No. 4, pp. 452-457;
- [MEI11] Meiners, W., Schleifenbaum, J.H., (2011). *Verfahren zur Herstellung eines Bauteils mittels selektivem Laserschmelzen*, German Patent No. DE102011105045B3;
- [MEI96] Meiners, W., Wissenbach, K., Gasser, A., (1996). *Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers*, German patent DE 19649865C1, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung;
- [MOR10] Moraroiu, C.O., (2010). *Probabilități și Statistică aplicată*, Editura Universității Transilvania din Brașov;
- [MOR13] Moraroiu, C.O., (2013). *Statistică aplicată*, Editura Universității Transilvania din Brașov;
- [MOW16] Mower, T.M., Long, M.J., (2016). *Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 651, pp 198-213;
- [MUR12] Muresan, S.C., (2012). *Researches regarding the mechanical strength of complex metal parts manufactured by selective laser melting*, PhD Thesis, Technical University of Cluj-Napoca.

- [OAN13] Oancea, G., Ivan, N.V, Pescaru, R., (2013). *Computer Aided Reverse Engineering system used for customized products*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 11, No. 4, pp.30-35.
- [PAP17] Papadatu, C.P., Sandu, I.G., Bordei, M., Sandu, A.V., (2017). *Evolution of the Plasticity of Some Low Carbon Steels, Subjected to Directed Cooling from High-temperature*, Materiale Plastice, Vol. 54, No. 4, pp. 759-763
- [PAR11] Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., (2011). *A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures. With tailored mechanical properties for biomedical applications*, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 13, No. 2, pp. 160–170;
- [PES16] Pescaru, R., Kyratsis, P., Oancea, G., (2016). *A Case Study of Reverse Engineering Integrated in an Automated Design Process*, 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 161, 012029.
- [PES17] Pescaru, R., Kyratsis, P., Oancea, G., (2017). *Software tool used for automated design of customizable product*, MATEC Web of Conferences - MTeM - AMaTUC, Vol. 137, 06003.
- [RAJ08] Raja, V., Fernandes, K.J., (2008). *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*, Editura Springer-Verlag London Limited;
- [ROY10] Roy, M., (2010). *Vickers Hardness Measurements: Practices and Calibration Check*, the University of British Columbia, Internal Technical Bulletin, Department of Materials Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- [RUS17] Rusu, M.A., Leordean, D., Cosma, D., Filip, M., Moldovan, M., Silaghi-Dumitrescu. L., Orasan, O.H., (2017). *Characterization polyethylene terephthalate nanocomposites mixing with nano-silica and titanium oxide*, MATEC Web of Conferences - MTeM – AMaTUC, Vol. 137, 08005.
- [SON14] Song, B., Dong, S., Deng, S., Liao, H., Coddet, C., (2014). *Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting*, Optics & Laser Technology, Vol. 56, pp. 451-460;
- [SUN16] Sun, Z., Tan, X., Tor, S.B., Yeong, W.Y., (2016). *Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates*, Materials & Design, Vol. 104, pp. 197-204;
- [TOT14] Tóth, T., Živčák, J., (2014). *A Comparison of the Outputs of 3D Scanners*, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 393 – 401;
- [TUR18] Turcin, I., Cosma, C., Abdallah, A., Balci, N., (2018). *Design for additive manufacturing a sweat gland simulator*, 7th International Conference on Additive Technologies;
- [THI10] Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., VanHumbeeck, J., Kruth, J.P., (2010). *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V*, Acta Materialia, Vol.58, No. 9, pp. 3303–3312;

- [UDR12] Udriou, R., (2012). *Powder bed additive manufacturing systems and its applications*, Academic journal of manufacturing engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 122-129;
- [UDR17] Udriou, R., Braga, I.C., (2017). *Polyjet technology applications for rapid tooling*, MAT EC Web of Conferences, 21st Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IManE&E 201 , Vol. 112, pp.1-6;
- [UDR17a] Udriou, R., (2017). *Additive manufacturing technologies used for superalloys processing*, MAT EC Web of Conferences, The 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 – CoSME'16, Vol. 94, pp. 1-6;
- [WOH11] Wohlers, T., (2010). *Additive Manufacturing State of the Industry*, Wohlers Associates Inc.;
- [WOH12] Wohlers, T., (2012). *Recent Trends In Additive Manufacturing*, Proceedings of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing, Paris, France;
- [WOH14] Wohlers, T., (2014). *Wohlers Report 2014*, Wohlers Associates Inc.;
- [XUB13] Su, X., Yang, Y., Xiao, D., Luo, Z., (2013). *An investigation into direct fabrication of fine-structured components by selective laser melting*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 64, No. 9-12, pp. 1231-1238;
- [YAD10] Yadroitsev, I., Smurov, I., (2010). *Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape*, Physics Procedia, Vol. 5, No. Part B, pp. 551-560;
- [ZAE10] Zaeh, M.F., Branner, G., (2010). *Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting*, Production Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 35-45;
- [ZAH07] **Zaharia S., Buican G., Martinescu I.,** (2007). *Analytical Determination of Reliability using the general equation of reliability, used in probabilistic design of mechanical systems*, Challenges in higher education and research in the 21-st century, Technical University of Sofia, Bulgaria;
- [ZAH07b] **Zaharia S., Buican G., Martinescu I.,** (2007). *A study about reliability tests with suspended elements*, Challenges in higher education and research in the 21-st century, Technical University of Sofia, 5-9 june , Bulgaria;
- [ZHA10] Zhang, D.Q., Cai Q.Z., Liu J. H., Zhang L., Li R. D., (2010). *Select laser melting of W-Ni-Fe powders- simulation and experimental study*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , Vol. 51, No. 5-8, pp. 649-658;
- [WWW01] <http://manufacturing.materialise.com/all-available-materials>
- [WWW02] <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/calm/whatis/>
- [WWW03] <http://3daddfab.com/blog/index.php?/archives/4-What-is-an-STL-file-and-is-it-obsolete.html>
- [WWW04] <http://masuratori3d.blogspot.com/2010/05/prototipare-rapida-piese-injectate.html>

Scurt rezumat (română / engleză)

Rezumat

Teza de doctorat intitulată "Cercetări privind fabricarea prin topire selectivă cu laserul a pieselor din oțel inox 316 L" abordează problematica fabricării produselor industriale utilizând procedeul de topire selectivă cu laserul – SLM, din oțel inox 316 L. În cadrul lucrării sunt prezentate cercetări desfășurate de autor, în direcția determinării microdurității pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul din oțel inox 316 L evidențiindu-se influența pe care mărimea stratului de pulbere și poziționarea pieselor pe masa de lucru o au asupra microdurității și a timpilor de fabricație.

De asemenea, este dezvoltată de autor și aplicată, o metodologie de analiză cantitativă și calitativă a microstructurii pieselor obținute prin topirea selectivă cu laserul din oțel inox 316 L, în funcție de grosimea stratului de pulbere.

Cercetările desfășurate sunt materializate prin elaborarea a două studii de caz, unul privind reproiectarea și refabricarea, din oțel inox 316L, a unei roți dințate deteriorate pentru care nu mai există documentație tehnică și, al doilea, privind fabricării unui molar mandibular și a unui premolar în vederea integrării și utilizării lor într-un stand destinat testării la oboseală a instrumentelor dentare.

Abstract

The Ph.D. thesis entitled "Research on the manufacture by selective laser melting of stainless steel parts 316 L" addresses the problem of manufacturing of industrial products using the selective laser melting process - SLM, made of stainless steel 316 L. The paper presents research carried out by the author in the direction of determining the microhardness of the parts produced by the selective laser melting process from stainless steel 316 L, showing the influence of the size of the powder layer and the positioning of the parts on the work table on the microhardness and the manufacturing times.

It is also developed by the author and applied a methodology of quantitative and qualitative analysis of the microstructure of the parts obtained by selective laser melting using 316 L stainless steel, depending on the thickness of the powder layer.

The researches carried out are materialized by elaborating two case studies, one on the redesign and re-engineering of a 316L stainless steel damaged gear wheel for which there is no technical documentation, and the second on the manufacture of a mandibular molar and a premolar in the view to their integration and use in a stand for fatigue testing of dental instruments.

CV (română / engleză)

CV - română

INFORMAȚII PERSONALE

Buican George Razvan



buican.george@unitbv.ro

Sexul: masculin | Data nașterii:

| Naționalitatea: român

EXPERIENȚA PROFESIONALĂ

2014 - prezent

Doctorand, Universitatea Transilvania din Brașov – Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial, Cercetare

EDUCAȚIE ȘI FORMARE

(2005 - 2007)

Diploma master Ingineria și managementul Calității

Universitatea Transilvania din Brașov – Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial

(2000 - 2005)

Inginer diplomat Construcții Aerospațiale

Universitatea Transilvania din Brașov – Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial – secția Construcții Aerospațiale

(1996 - 2000)

diploma bacalaureat

Liceul CFR Brașov – secția electromecanic telecomunicații

COMPETENȚE PERSONALE

Limba maternă

Română

Alte limbi străine cunoscute

ÎNȚELEGERE

VORBIRE

SCRIERE

Ascultare

Citire

Participare la
conversație

Discurs oral

Engleză

C1

C1

C1

C1

C1

Franceză

A1

A1

A1

A1

A1

Competențe de comunicare

bune competențe de comunicare dobândite prin experiența proprie de doctorand

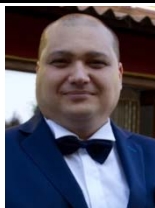
Permis de conducere


B

CV - engleză

PERSONAL INFORMATION

Buican George Razvan



 buican.george@unitbv.ro

Sex: male | Date of birth: | Nationality: român

WORK EXPERIENCE

2014 - prezent

Phd., Universitatea Transilvania din Braşov – Faculty of Technological Engineering and Industrial Management, Reaserch

EDUCATION AND TRAINING

(2005 - 2007)

Master degree - Quality engineering and managemnet

Universitatea Transilvania din Braşov, Faculty of Technological Engineering and Industrial Management

(2000 - 2005)

Engeneering degree Aerospatal Constructions

Universitatea Transilvania din Braşov – Faculty of Technological Engineering and Industrial Management – Aerospatal Constructions

(1996 - 2000)

Bachelor degree

CFR Braşov Highschool - electromechanical telecommunication section

PERSONAL SKILLS

Mother tongue

Romanian

Other language

UNDERSTANDING

SPEAKING

WRITING

Listening

Reading

Spoken interaction Spoken production

English

C1

C1

C1

C1

C1

French

A1

A1

A1

A1

A1

Communication skills

good communication skills acquired through their own PhD experience

Driving licence

B

LISTA PUBLICAȚII

- [BUI07] Buican, G.R., Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2007). *Simulation of Reliability parameters using the Monte Carlo Method*, Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Vol. 1, pp. 17-21;
- [BUI07b] Buican, G.R., Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2007). *Study about Reliability life testing and types of data*, Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Vol. 1, pp. 21-26;
- [BUI14] Buican, G.R., Oancea, G., Manolescu, A., (2014). *Remanufacturing of Damaged Parts Using Selective Laser Melting Technology*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 693, pp. 285-290;
- [BUI15] Buican, G.R., Oancea, G., Lancea, C., Pop, M.A., (2015). *Influence of Layer Thickness on Internal Structure of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*, Applied Mechanics and Materials, zvol. 809-810, pp. 369-374;
- [BUI15b] Buican, G.R., Oancea, G., Lancea, C., Pop, M.A., (2015). *Considerations Regarding Micro Hardness of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 760, pp. 515-520;
- [BUI16] Buican, G.R., Oancea, G., Rui, F. M., (2017). *Study on SLM manufacturing of teeth used for dental tools testing*, MATEC Web Conf., The 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 - CoSME'16, Vol. 94, pp. 1-10;
- [ZAH07] Zaharia S., Buican G., Martinescu I., (2007). *Analytical Determination of Reliability using the general equation of reliability, used in probabilistic design of mechanical systems*, Challenges in higher education and research in the 21-st century, Technical University of Sofia, Bulgaria;
- [ZAH07b] Zaharia S., Buican G., Martinescu I., (2007). *A study about reliability tests with suspended elements*, Challenges in higher education and research in the 21-st century, Technical University of Sofia, 5-9 june, Bulgaria;