



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică
Departamentul de Mecatronică și Mecanică de Precizie

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Cercetări privind realizarea protezelor dentare prin depuneri selective cu laser și prin alte tehnologii aditive

Research on the realization of dental prostheses by selective laser deposition and other additive technologies

Autor:
Ing.Edgar Moraru

Conducător de doctorat:
Prof.dr.ing.Octavian Donțu

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof.dr.ing. Radu CHIRIAC	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof.dr.ing. Octavian DONȚU	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof.dr.ing. Cătălin ALEXANDRU	de la	Universitatea Transilvania din Brașov
Referent	Prof.dr. Alexandru PETRE	de la	Universitatea de Medicină și Farmacie "Carol Davila" din București
Referent	Prof.dr.ing. Dănuț-Ionel VĂIREANU	de la	Universitatea Politehnica din București

București
2021

CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

PREFAȚĂ.....	9
INTRODUCERE.....	11
CAPITOLUL 1. UNELE PROBLEME PRIVIND ANATOMIA ȘI PROTETICA DENTARĂ. 13	
1.1. Anatomia dentară.....	13
1.1.1. <i>Dentiția și rolul dinților</i>	<i>13</i>
1.1.2. <i>Clasificarea dinților</i>	<i>14</i>
1.1.3. <i>Structura anatomică a dintelui.....</i>	<i>15</i>
1.1.4. <i>Structura histologică a dintelui.....</i>	<i>15</i>
1.1.5. <i>Parodontiul marginal.....</i>	<i>16</i>
1.1.6. <i>Afecțiuni ale dinților.....</i>	<i>17</i>
1.2. Protetica dentară	18
1.2.1. <i>Introducere în protetica dentară</i>	<i>18</i>
1.2.2. <i>Indicații, contraindicații și probleme privind protezele dentare.....</i>	<i>18</i>
1.3. Clasificarea protezelor dentare.....	19
1.3.1 <i>Proteze dentare în funcție de mobilitate.....</i>	<i>20</i>
1.3.2. <i>Proteze dentare în funcție de modul de agregare cu țesuturile dentare ale pacientului.....</i>	<i>20</i>
1.3.3. <i>Proteze dentare în funcție de aspectul estetic</i>	<i>21</i>
1.3.4. <i>Proteze dentare în funcție de materialul din care sunt realizate.....</i>	<i>21</i>
1.3.5. <i>Proteze dentare în funcție de tehnologia de procesare pentru obținere</i>	<i>22</i>
1.4. Concluzii privind anatomia și protetica dentară.....	24
CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL PRIVIND PROCEDEELE DE REALIZARE A PROTEZELOR DENTARE.....	25
2.1. Unele cerințe din punct de vedere clinic și tehnologic privind realizarea protezelor dentare.....	26
2.2. Execuția prin turnare a protezelor dentare	26
2.3. Tehnologii de realizare a protezelor dentare prin deformare plastică a materialelor metalice.....	28
2.4. Obținerea protezelor dentare prin galvanoformare.....	29
2.5. Realizarea protezelor dentare prin polimerizare	30
2.6. Execuția protezelor dentare prin eroziune cu ultrasunete	31
2.7. Realizarea protezelor dentare prin electroeroziune.....	32
2.8. Execuția protezelor dentare prin frezare CAD-CAM.....	33
2.9. Realizarea protezelor dentare prin sinterizare/topire selectivă cu laser	35
2.10. Studiu comparativ privind procedeele de realizare a protezelor dentare.....	37
2.11. Concluzii privind procedeele de obținere a protezelor dentare	39

CAPITOLUL 3. BIOMATERIALE UTILIZATE PENTRU REALIZAREA PROTEZELOR DENTARE	40
3.1. Biomateriale și aplicațiile acestora.....	40
3.1.1. Biomateriale	40
3.1.2. Biocompatibilitatea	41
3.1.3. Parametri pentru selecția biomaterialelor	41
3.1.4. Unele aplicații ale biomaterialelor	42
3.2. Caracteristici și proprietăți ale biomaterialelor utilizate în protetica dentară.....	43
3.2.1. Caracteristici și proprietăți fizice	43
3.2.2. Caracteristici și proprietăți termice	44
3.2.3. Caracteristici și proprietăți electrice	44
3.2.4. Caracteristici și proprietăți optice	44
3.2.5. Caracteristici și proprietăți mecanice.....	44
3.2.6. Biomaterialul ideal pentru proteze dentare.....	45
3.3. Principalele clase de biomateriale utilizate în protetica dentară	46
3.3.1. Biomateriale metalice.....	46
3.3.2. Biomateriale ceramice.....	48
3.3.3. Biomateriale polimerice	48
3.4. Studiu comparativ privind biomaterialele utilizate în protetica dentară și criterii pentru alegerea optimă a biomaterialului de protezare	49
3.5. Concluzii privind biomaterialele utilizate în protetica dentară	57
CAPITOLUL 4. TEHNOLOGII ADITIVE PENTRU REALIZAREA PROTEZELOR DENTARE ȘI PROCEDEE DE POST-PROCESARE ALE ACESTORA	58
4.1. Unele considerații privind impactul tehnologiilor aditive asupra aplicațiilor în stomatologie	58
4.1.1. CNC vs tehnologiile aditive.....	58
4.1.2. Avantajele și dezavantajele tehnologiilor aditive.....	59
4.1.3. Aplicații ale tehnologiilor aditive.....	60
4.2. Clasificarea tehnologiilor aditive	63
4.3. Tehnologii aditive după principiul de funcționare cu aplicații în protetica dentară	64
4.3.1. Tehnologii aditive prin fotopolimerizare cu aplicații în protetica dentară.....	64
4.3.2. Tehnologii aditive prin extrudare termoplastică cu aplicații în protetica dentară.....	66
4.3.3. Tehnologii aditive prin pulverizare de material cu aplicații în protetica dentară.....	67
4.3.4. Tehnologii aditive prin pulverizare de liant cu aplicații în protetica dentară	68
4.3.5. Tehnologii aditive prin fuziunea patului cu pulberi cu aplicații în protetica dentară	69
4.3.6. Tehnologii aditive prin depunere cu energie directă cu aplicații în protetica dentară	71
4.4. Procedee de post-procesare a protezelor dentare realizate prin tehnologii aditive.....	72

Cercetări privind realizarea protezelor dentare prin depuneri selective cu laser și prin alte tehnologii aditive

4.4.1. Unele probleme care pot apare la realizarea protezelor dentare prin tehnologii aditive ..	73
4.4.2. Necesitatea procedeelor de post-procesare	74
4.4.3. Clasificarea procedeelor de post-procesare	74
4.4.3.1. Unele tehnologii de post-procesare ale modelelor protetice dentare executate prin extrudare termoplastică	75
4.4.3.2. Unele tehnologii de post-procesare ale modelelor dentare executate prin fotopolimerizare în cuvă.....	77
4.4.3.3. Unele tehnologii de post-procesare ale protezelor dentare executate prin topire selectivă cu laser	77
4.5. Cercetări privind finisarea prin polisare electrochimică a protezelor dentare realizate prin depuneri selective cu laser	78
4.6. Concluzii privind tehnologiile aditive pentru realizarea protezelor dentare și procedeele de post-procesare ale acestora.....	80
CAPITOLUL 5. REZULTATE ALE CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE PRIVIND STABILIREA PARAMETRILOR OPTIMI DE REALIZARE A PROTEZELOR DENTARE PRIN TOPIRE SELECTIVĂ CU LASER ȘI PRIN ALTE TEHNOLOGII ADITIVE	82
5.1. Etape la realizarea protezelor dentare prin tehnologii aditive.....	82
5.2. Imprimante și sisteme de programe pentru realizarea modelelor protetice dentare prin extrudare termoplastică.....	83
5.2.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea modelelor dentare pe imprimanta Wanhao Duplicator 4S	83
5.2.2. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea modelelor dentare pe imprimanta MakerBot Replicator.....	87
5.2.3. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea modelelor dentare pe imprimanta de tip Delta	89
5.2.4. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea modelelor dentare pe imprimanta cu extruder de tip diamant.....	91
5.2.5. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind utilizarea materialelor termoplastice pentru realizarea modelelor dentare.....	96
5.3. Imprimante și sisteme de programe pentru realizarea modelelor protetice dentare prin fotopolimerizare în cuvă	100
5.3.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea modelelor dentare pe imprimanta DLP Duplicator 7	100
5.3.2. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind rășinile fotopolimerice utilizate pentru realizarea modelelor dentare	103
5.4. Instalații și sisteme programe pentru realizarea protezelor dentare prin topire selectivă cu laser.....	105
5.4.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea protezelor dentare pe instalația de topire selectivă cu laser SISMA MySint 100.....	105
5.4.2. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind materialele utilizate pentru realizarea protezelor dentare prin topire selectivă cu laser	107

Cercetări privind realizarea protezelor dentare prin depuneri selective cu laser și prin alte tehnologii aditive

5.5. Instalații și sisteme de programe pentru realizarea protezelor dentare prin sinterizare selectivă cu laser 116

5.5.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea protezelor dentare pe instalația de sinterizare selectivă cu laser Formiga P110..... 116

5.6. Instalații și sisteme de programe pentru realizarea protezelor dentare prin tehnologii CAD-CAM substructive..... 124

5.6.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea protezelor dentare pe instalația de frezare Ceramill Motion 2 124

5.6.2. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind realizarea protezelor dentare pe instalația de frezare Sirona CEREC MC XL..... 129

5.7. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind obținerea modelelor dentare personalizate prin intermediul unei scanări intraorale digitale..... 132

5.8. Analiza prin metoda elementelor finite a protezelor și modelelor dentare 135

CAPITOLUL 6. MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE TOPIRE SELECTIVĂ CU LASER..... 148

6.1. Rezolvarea ecuațiilor pentru transferul de căldură din timpul procesului de topire selectivă cu laser 148

6.2. Studiul influenței unor parametri de proces asupra temperaturii biometalelor în timpul procesului de topire selectivă cu laser 160

CAPITOLUL 7. REZULTATE ALE CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERISTICILE ȘI PROPRIETĂȚILE PROTEZELOR DENTARE REALIZATE PRIN TOPIRE SELECTIVĂ CU LASER ȘI PRIN ALTE TEHNOLOGII ADITIVE..... 163

7.1. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind testarea la unele solicitări mecanice a modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive 163

7.2. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind rezistența la uzură a materialelor utilizate pentru modelele protetice dentare 180

7.3. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind precizia și calitatea suprafețelor protezelor și modelelor dentare realizate prin tehnologii aditive 184

7.3.1. Cercetări privind precizia dimensională a modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive..... 184

7.3.2. Analiza termografică a modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive..... 192

7.3.3. Determinări experimentale a grosimii straturilor depuse prin tehnologii aditive 197

7.3.4. Rezultate ale determinărilor experimentale ale nanorugozității protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser cu ajutorul microscopului de forță atomică 203

7.3.5. Studiul calității suprafețelor prin analiza macroscopică a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser..... 209

7.4. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind analiza elementală cu raze X a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser 215

7.5. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind determinarea durității pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser 232

CONCLUZII.....	237
C1 Concluzii generale	237
C2 Contribuții originale.....	237
C3 Perspective privind dezvoltarea cercetărilor pentru tehnologiile de execuție a protezelor dentare în viitor	239
Bibliografie.....	240
ANEXE	247
Anexa 1. Lista lucrărilor publicate	247
Anexa 2. Unele rezultate ale determinărilor nanorugozității pentru protezele dentare în stare brută, finisate și lustruite	250

INTRODUCERE ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

În ultimii ani, tehnologiile aditive ocupă un loc din ce în ce mai important în domeniul medical și mai ales în stomatologie. Imprimarea 3D este aplicată în mai multe domenii ale sănătății și acest lucru a îmbunătățit semnificativ starea generală de sănătate a pacienților care au nevoie de servicii medicale urgente și de calitate. Importanța și necesitatea protezării dentare se datorează nu doar problemelor estetice, ci și din cauza modificărilor patologice inevitabile și ireversibile ale structurii țesuturilor aparatului dento-maxilar generate de absența sau degradarea dinților, dar și a particularităților necesare pentru caracteristicile funcționale ale aparatului masticător, care influențează direct starea de sănătate a organismului la nivel sistemic. În plus, actualitatea problematicei protezării dentare nu se limitează doar la aspectul medical. Absența parțială a dinților sau alte deficiențe dentare produse din diverse cauze afectează statutul social și starea psihoemoțională generală a pacientului. De aceea, înlocuirea și restaurarea imediată a țesuturilor dentare lipsă devine de o importanță vitală în acest caz pentru recăpătarea confortului, soluționarea problemelor medico-sociale și implicit pentru creșterea calității vieții.

La momentul actual, există mai multe variante tehnologice clasice și computerizate pentru substituirea dinților, fiecare dintre acestea având avantajele și limitările sale, iar succesul în timp a restaurărilor protetice dentare din punct de vedere tehnico-medical depinde de mai mulți factori, care trebuie analizați cu atenție, printre care se numără proprietățile și caracteristicile fizico-mecanice ale protezelor dentare sau gradul de biocompatibilitate ale materialului utilizat. De asemenea, în mod ideal, având în vedere particularitățile individuale ale situației dentare pentru fiecare pacient, protezele dentare realizate trebuie să corespundă cerințelor anatomice și fiziologice prin precizia de execuție și geometria adecvată, dar în același timp durata de execuție ale acestora și efectele disconfortului pacientului din timpul etapelor clinice înainte de protezare să fie cât mai reduse posibil.

În ultima perioadă, de un interes tot mai pronunțat se bucură metodele de fabricație aditivă în aplicațiile stomatologice, atât pentru realizarea protezelor sau coroanelor dentare, cât și pentru crearea modelelor dentare pentru viitoarea lucrare protetică. Având în vedere importanța protezării imediate în cazul deficiențelor dentare și toate cele menționate anterior, în teza de doctorat am urmărit în principal studiul, realizarea, caracterizarea și unele soluții de analiză și optimizare pentru protezele dentare executate prin depuneri selective cu laser, cât și pentru modelele dentare realizate prin alte tehnologii aditive care pot avea multiple aplicații în domeniul protetic dentar, printre care și rolul de prototip/model pentru viitoarea restaurare, iar printre principalele obiective stabilite care se doresc a fi atinse în lucrare se numără:

- Studiul țesuturilor dentare din punct de vedere anatomic și problemelor ce țin de natura proteticii dentare;
- Analiza stadiului actual privind procedeele de realizare a protezelor dentare și realizarea unui studiu comparativ ale acestora pentru identificarea avantajelor și dezavantajelor din mai multe considerente pentru fiecare metodă de obținere a protezelor;
- Efectuarea unui studiu privind biomaterialele utilizate în protetica dentară și caracteristicile esențiale ale acestora;
- Elaborarea unei metode originale de analiză comparativă a biomaterialelor protetice dentare ținând cont de caracteristicile și proprietățile esențiale ale acestora, în urma căreia se va putea alege mai simplu materialul corespunzător pentru fiecare pacient în parte, în funcție de mai mulți parametri și factori;
- Identificarea tehnologiilor și materialelor utilizate în fabricația aditivă cu posibile aplicații în domeniul proteticii dentare și procedeele de post-procesare ale acestora, cât și propunerea unor alte aplicații ale tehnologiilor aditive în medicină și alte domenii;
- Realizarea unor proteze dentare și modele dentare prin intermediul mai multor

tehnologii aditive – depuneri selective cu laser, extrudare termoplastică, fotopolimerizare în cuvă, dar și prin tehnologii moderne substructive CAD-CAM, utilizând diferite echipamente, materiale, sisteme de programe și caracteristici/condiții de imprimare, în același timp caracterizând comparativ elementele obținute prin tehnologii aditive și identificând soluții de analiză și optimizare ale acestora pentru aplicațiile proteticii dentare;

- Utilizarea analizei numerice prin metoda elementelor finite pentru simularea structurilor dentare obținute pe baza unei scanări intraorale digitale personalizate;
- Modelarea matematică a procesului de topire selectivă cu laser și determinarea influenței unor parametri importanți de proces asupra caracteristicilor termice ale unor biometale dentare din timpul fabricației;
- Evaluarea caracteristicilor mecanice pentru modelele dentare realizate prin tehnologii aditive diferite, din materiale și pe echipamente diferite, prin supunerea la unele solicitări mecanice, prelucrând și comparând datele experimentale obținute;
- Identificarea pe cale experimentală a celor mai potrivite materiale pentru realizarea modelelor dentare din punct de vedere al rezistenței la uzură;
- Efectuarea unor cercetări experimentale privind precizia dimensională a modelelor realizate prin tehnologii aditive în funcție de materialul și echipamentul utilizat, identificând posibile cauze de apariție a erorilor dimensionale prin utilizarea unor sisteme de măsurare moderne;
- Examinarea stării suprafețelor și compoziției chimice pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser aflate în stadiu diferit de post-procesare utilizând metode și instrumente optice avansate;
- Determinarea pe cale experimentală a durtății protezelor dentare polisate realizate prin topire selectivă cu laser și comparația rezultatelor obținute cu valorile durtății pentru același aliaj, dar realizat prin tehnologii clasice;
- Concluzionarea studiilor realizate și stabilirea unor perspective de dezvoltare a cercetărilor privind protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser și modelele dentare realizate prin tehnologii aditive.

Cu scopul de a atinge obiectivele stabilite pentru teza de doctorat și de a realiza mai multe studii și cercetări originale, au fost utilizate echipamente, metode și programe avansate și variate pentru execuția, analiza și caracterizarea protezelor dentare și modelelor de studiu.

Stagiul doctoral a fost susținut parțial de Programul Operațional Capital Uman, Axa prioritară 6 – Educație și competențe, Proiect: Burse pentru educația antreprenorială în rândul doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat (BeAntreprenor!) Cod MySMIS: 124539

SINTEZA CONȚINUTULUI TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat cuprinde o prefață și o introducere, iar apoi este structurată în șapte capitole, așa cum se prezintă în cuprins și se încheie cu concluzii, bibliografie și anexe. Teza numără în total **264** pagini și **206** referințe bibliografice. O parte din cercetările dezvoltate în teză au fost diseminate prin participarea la manifestări științifice internaționale și/sau publicarea unor articole științifice cu rezultatele cercetărilor în reviste de specialitate, cotate ISI și/sau BDI.

În **Capitolul 1** intitulat “**Unele probleme privind anatomia și protetica dentară**” se prezintă principalele elemente histologice și geometrice ale dinților, clasificarea și rolul dinților, cât și principalele afecțiuni dentare care conduc la necesitatea protezării. De asemenea, în acest capitol se prezintă clasificarea protezelor dentare din mai multe puncte de vedere: în funcție de mobilitate, în funcție de aspectul estetic (Fig. 1), modul de agregare la țesuturile dentare și materialul utilizat (Fig. 2) și în funcție de tehnologia de execuție a protezelor [4] [6] [10] [11] [15] [31].



Fig. 1. Proteze dentare studiate în funcție de aspectul estetic



Fig. 2. Proteze dentare studiate în funcție de material și modul de agregare la țesuturile dentare

În **Capitolul 2** intitulat „**Stadiul actual privind procedeele de realizare a protezelor dentare**” se prezintă principalele tehnologii de execuție a protezelor dentare actuale, evidențiind avantajele, dezavantajele și se studiază comparativ procedeele de realizare a protezelor dentare. În urma cercetării stadiului actual privind procedeele de realizare a protezelor dentare se concluzionează existența unei game largi de tehnologii și tehnici de înlocuire a țesuturilor dentare. Fiecare tehnologie de realizare a protezelor dentare are avantajele și dezavantajele sale, iar alegerea adecvată a acesteia este esențială cu scopul de a avea o utilitate și viabilitate optimă a elementelor protetice. Turnarea și tehnicile de obținere prin deformarea plastică a metalelor sunt cele mai potrivite variante din punct de vedere financiar de restaurare a dinților, dar sunt niște metode învechite, cu multe dezavantaje. În plus, gama materialelor este restrânsă. Un rol foarte important în fabricația protezelor dentare îl are alegerea materialului, care trebuie să fie compatibil cu țesuturile umane, pentru a evita respingerea protezei de către organismul pacientului. Tehnologiile de fabricație cu cele mai bune performanțe ale protezelor dentare realizate sunt fără îndoială tehnologiile computerizate CAD/CAM (frezarea CAD-CAM și SLM), care elimină o serie de deficiențe. Dintre tehnologiile computerizate în ultimul timp câștigă tot mai mult interes tehnologiile aditive, și anume tehnicile de sinterizare/topire selectivă cu laser (Fig. 3). Aceste metode de fabricație oferă o metodă eficientă și rapidă pentru proiectarea și realizarea carcaselor metalice biocompatibile pentru proteze dentare complexe. Tehnologiile SLS/SLM suplinesc dezavantajele tehnologiei de frezare – o precizie excelentă de fabricație și nu dau margini cu bavuri. În plus, este vorba de niște tehnologii aditive de material. Materialul nefolosit se poate reutiliza în procedeele următoare, ceea ce face ca aceste tehnologii să fie mult mai eficiente din punct de vedere economic decât frezarea [31] [51] [55] [56] [57].



Fig. 3. Proteze dentare realizate prin depuneri selective cu laser în formă brută/finisată din NiCr

În **Capitolul 3** „**Biomateriale utilizate pentru realizarea protezelor dentare**” am prezentat principalele clase de biomateriale pentru realizarea protezelor dentare, cât și proprietățile și caracteristicile esențiale ale acestora [58] [59] [61] [66] [70]. De asemenea, în cadrul acestui capitol am elaborat o metodă originală de analiză comparativă a biomaterialelor utilizate pentru realizarea protezelor dentare în funcție de principalele caracteristici și factorii esențiali, cu ajutorul căreia se poate alege mai ușor materialul corespunzător pentru fiecare pacient individual. În urma studiului realizat în acest capitol, se poate concluziona, că nici un biomaterial utilizat în protetica dentară nu posedă proprietăți ideale, fiecare având avantajele și dezavantajele sale. Un material ideal ar avea următoarele caracteristici: să nu prezinte pericol din punct de vedere biologic din motive evidente; să fie stabil din punct de vedere chimic și termic, să fie neiritant și biocompatibil; să corespundă cerințelor estetice – să existe o translucență și transparență suficientă; în mod rezonabil ieftin în ceea ce privește costul minim al materialelor și metoda de fabricație, care nu ar trebui să fie complexă; să posede proprietăți mecanice ridicate; pacientul să nu simtă gustul și mirosul materialului.

Metalele utilizate în stomatologie, deși au proprietăți mecanice aproape ideale, biocompatibilitate bună și un preț rezonabil, au o conductivitate termică și electrică relativ ridicată, ceea ce nu este indicat în cazul protezelor dentare. Materialele ceramice domină clar

la capitolul esteticii, biocompatibilității și bioinertității cu țesuturile adiacente, dar sunt extrem de scumpe și au proprietăți mecanice mai scăzute comparativ cu metalele. Construcțiile din materiale polimerice au avantajul fabricării ușoare și a prețului scăzut, în schimb proprietățile mecanice și durata de viață lasă mult de dorit. În urma efectuării analizei tuturor proprietăților și caracteristicilor importante ale materialelor utilizate în domeniul protetic, am elaborat un algoritm de calcul pentru alegerea materialului optim, constând în comparația materialelor studiate în ceea ce privește principalele caracteristici ale protezelor dentare. Pe baza acestui studiu, se poate revizui și alege mai ușor materialul potrivit pentru fiecare pacient individual, în funcție de mai mulți parametri și factori [31]. Unele secvențe din studiul comparativ pentru biomaterialele utilizate în protetica dentară sunt ilustrate în fig. 4 și fig. 5.

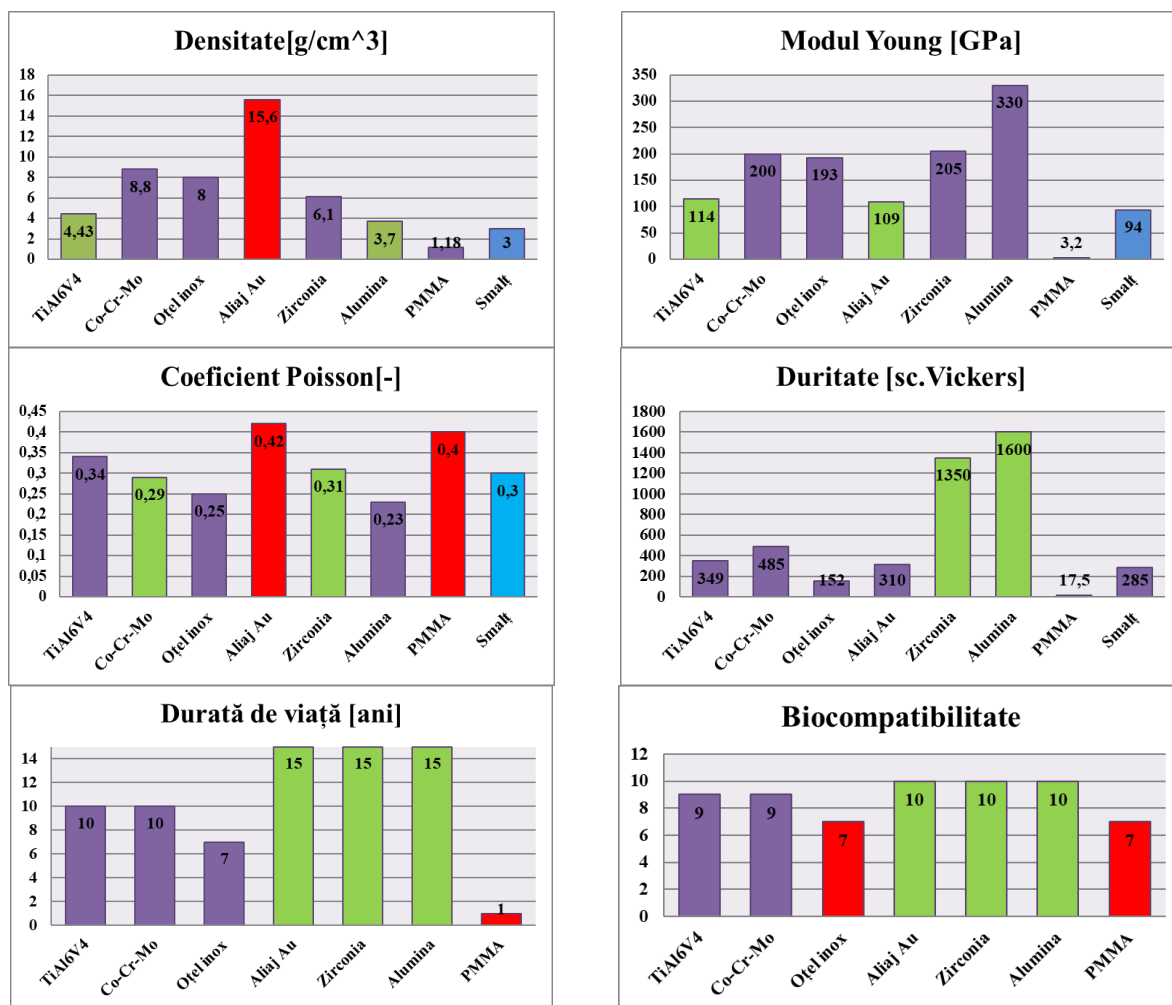


Fig. 4. Unele rezultate ale studiului comparativ privind proprietățile biomaterialelor utilizate în protetica dentară

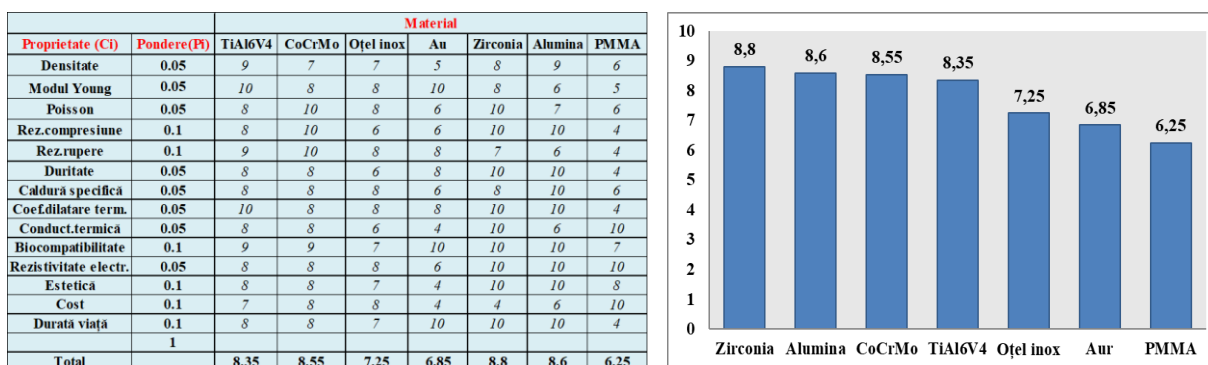


Fig. 5. Rezultatele analizei parametrilor de material

În **Capitolul 4 “Tehnologii aditive pentru realizarea protezelor dentare și procedee de post-procesare ale acestora”** se prezintă tehnologiile și materialele utilizate în fabricația aditivă cu posibile aplicații în domeniul proteticii dentare și procedeele de post-procesare ale acestora [31] [82] [89] [90] [93] [97] [98] [100] [102] [110] [115]. În fig. 6 se prezintă unele aplicații posibile ale tehnologiilor aditive cercetate experimental.

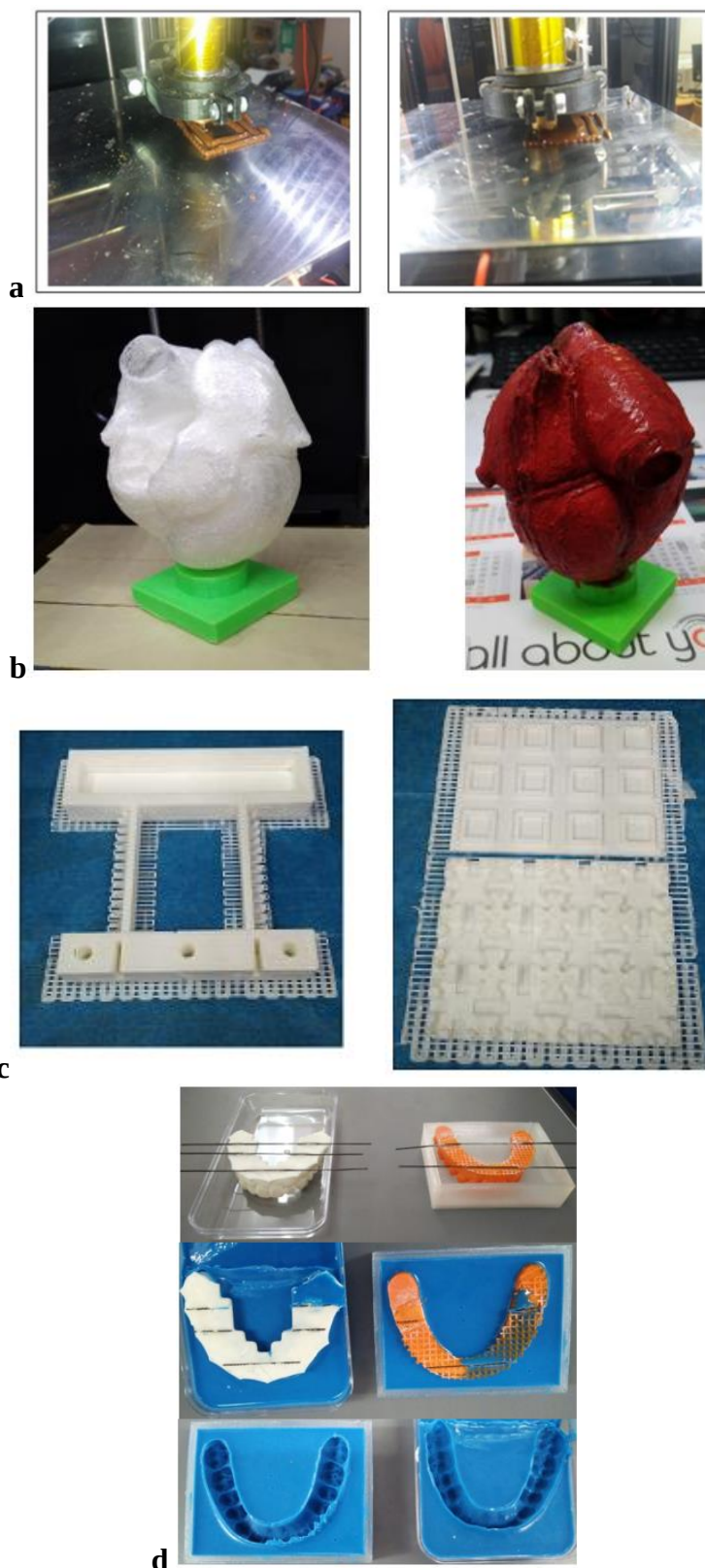


Fig. 6. Aplicații posibile ale tehnologiilor aditive cercetate: a – domeniu alimentar ; b – prototipuri anatomice ; c – domeniul MEMS ; d – modele de turnare

De asemenea, în acest capitol s-au clasificat și s-au pus în evidență diferențele între cele mai importante metode de fabricație aditivă în funcție de mai multe considerente. Am identificat cele mai populare procese de imprimare 3D în funcție de principiul de funcționare, după materialul utilizat și după forma materiei prime.

Au fost prezentate principalele tipuri de tehnologii aditive cu aplicații posibile în protetica dentară (Fig. 7), cât și procedeele de post-procesare ale acestora. Acestea au fost clasificate după principiul de funcționare și descrise, evidențiind avantajele și dezavantajele fiecărei în parte.

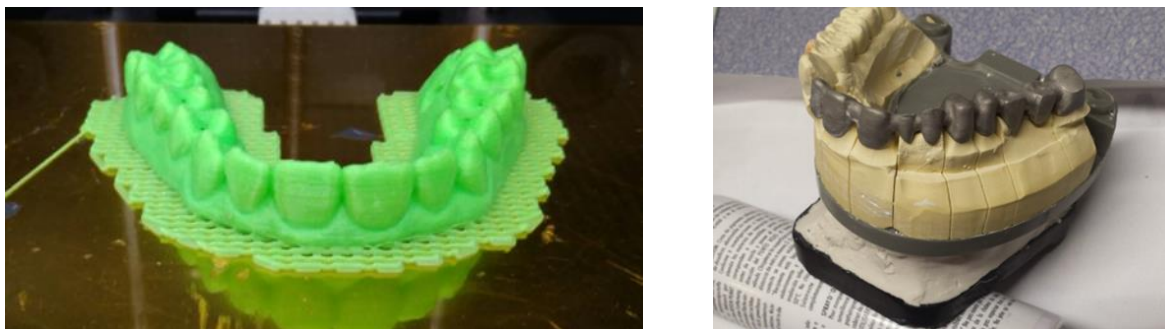


Fig. 7. Model protetic dentar realizat prin extrudare termoplastică FDM și proteză dentară realizată prin topire selectivă cu laser

Se poate concluziona că fabricația aditivă devine din ce în ce mai importantă pe piața mondială, datorită proprietăților sale exclusive, dar marea problemă rămâne calitatea suprafețelor imprimate, de aceea etapele de post-procesare sunt indispensabile pentru a obține proteze dentare fiabile cu proprietăți dorite și de înaltă performanță. De aceea, s-au cercetat tehnologiile de finisare în funcție de procedeul aditiv utilizat. S-a făcut o clasificare a procedeele de post-procesare a tehnologiilor aditive, evidențiindu-se importanța majoră a acestora. Procedeele de post-procesare la materialele metalice obținute prin adăugare de material sunt cele mai importante, fiind vorba de o piesă finită, și nu de un prototip. În cazul de față, fiind vorba de o bioproteză dentară, finisarea devine crucială cu scopul de a obține o restaurare protetică care nu va afecta pacientul și va avea durată lungă de viață. În fig. 8 se prezintă proteze dentare din aliaj Co-Cr-W realizate prin topire selectivă cu laser aflate în trei stadii diferite de post-procesare – stare brută, finisată și lustruită pe cale mecanică, unde se poate observa într-un mod evident cum operațiile de post-procesare influențează aparența protezelor. Una din cele mai potrivite metode de finisare ale acestor proteze se poate dovedi a fi finisarea prin polisare electrochimică, în urma căreia se obțin piese cu aspect lucios cu rezistența la oboseală îmbunătățită datorită eliminării tensiunilor reziduale. De asemenea, crește și rezistența la coroziune în urma polisării anodice.



Fig. 8. Proteze dentare realizate prin depuneri selective cu laser aflate în diferite stadii de post-procesare

În **Capitolul 5** intitulat **“Rezultate ale cercetărilor experimentale privind stabilirea parametrilor optimi de realizare a protezelor dentare prin topire selectivă cu laser și prin alte tehnologii aditive”** am prezentat realizarea protezelor dentare și modelelor protetice dentare prin trei tehnologii aditive diferite: fuziunea patului cu pulberi – topire/sinterizare selectivă cu laser, extrudare termoplastică – procedeul FDM și fotopolimerizare în cuvă – procedeul DLP. În plus, am prezentat realizarea protezelor dentare și prin tehnici moderne substructive utilizând sisteme specializate de frezare cu performanțe ridicate. De asemenea, am prezentat realizarea prin tehnologii aditive a unor modele dentare individuale personalizate obținute pe baza unei scanări intraorale digitale, cât și am realizat simulări prin metoda analizei elementelor finite a structurilor dentare obținute prin scanare [31] [97] [98] [122] [125] [130] [139] [141] [143].

Pentru realizarea elementelor protetice dentare au fost utilizate diferite echipamente, materii prime, sisteme software și parametri de proces pentru imprimare, iar structurile obținute, materialele și echipamentele au fost caracterizate și comparate, fiind identificate soluții de analiză și optimizare.

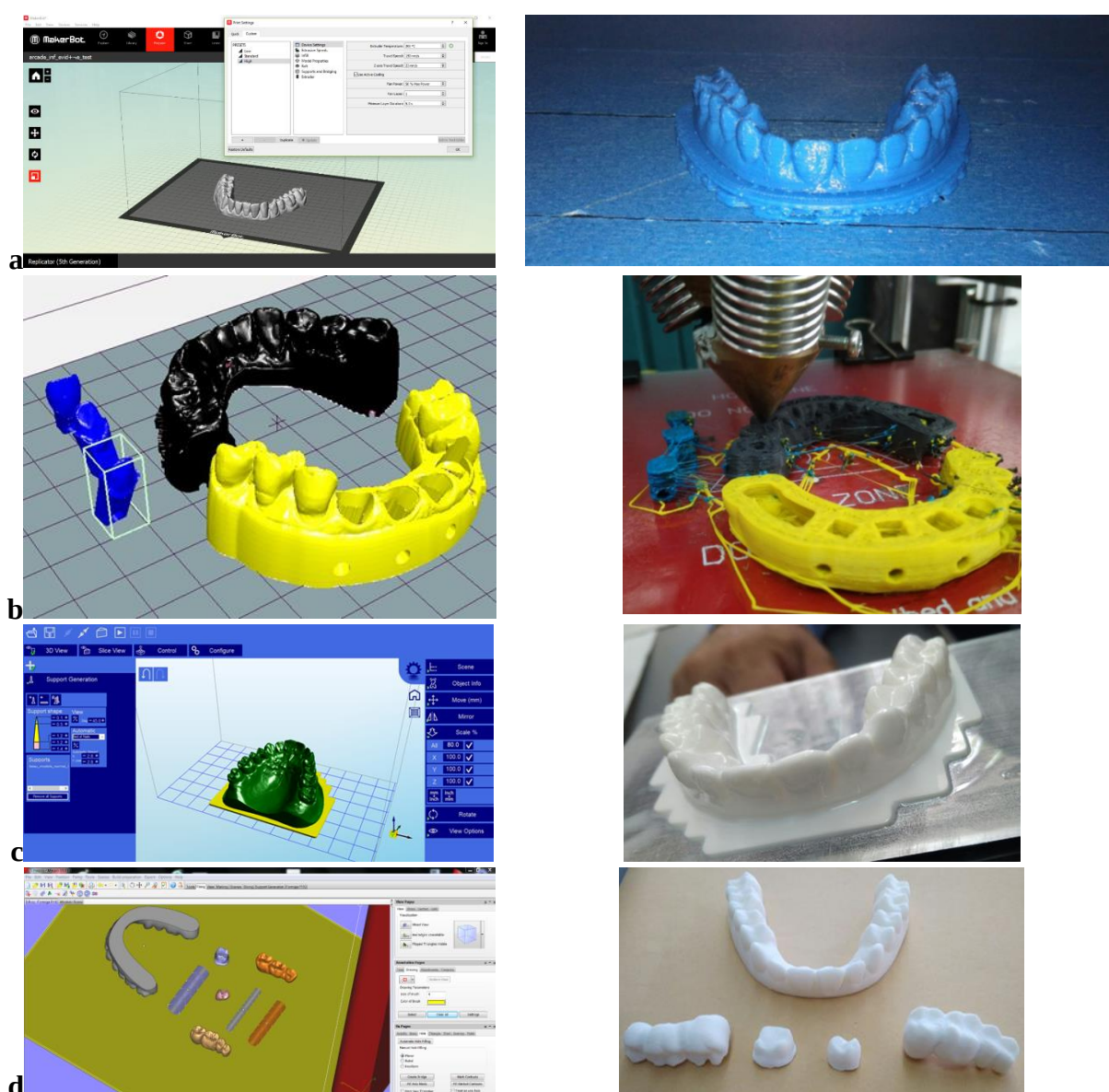


Fig. 9. Unele sisteme de programe utilizate și modele protetice dentare realizate prin diverse tehnologii aditive: a – FDM pe imprimanta Makerbot; b – FDM – imprimanta multicoloră cu extruder de tip diamant; c - fotopolimerizarea în cuvă – imprimanta Wanhao Duplicator 7; d – sinterizare selectivă cu laser – echipament SLS Formiga

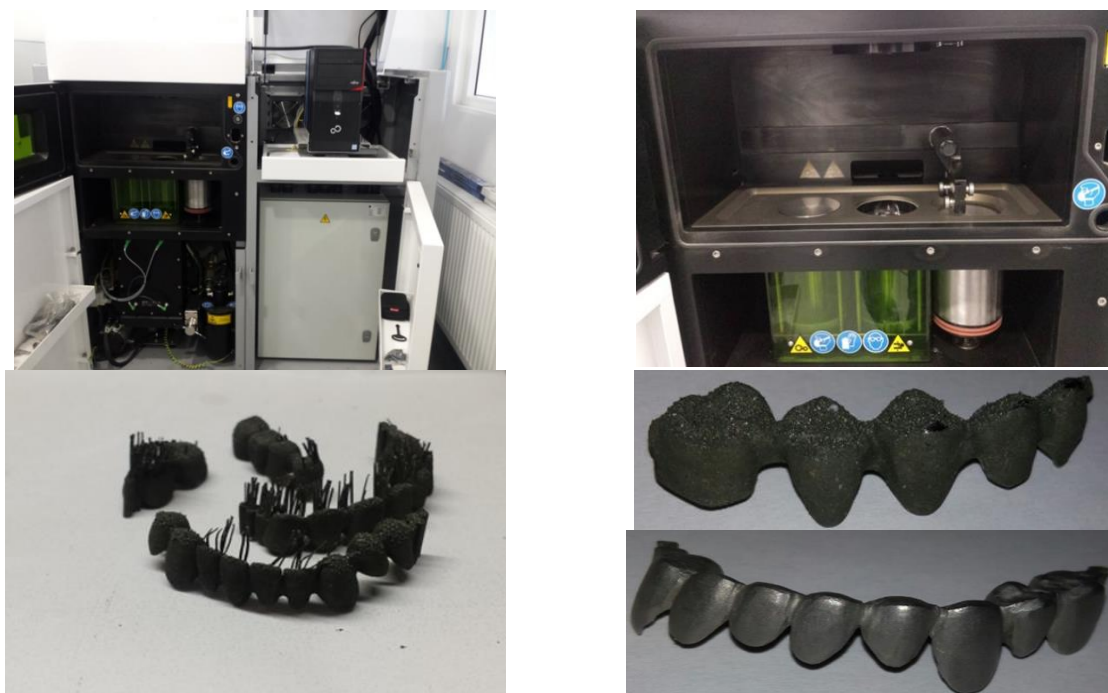


Fig. 10. Echipamentul utilizat și protezele realizate prin topire selectivă cu laser în stare brută și finisată

În fig. 10 se prezintă protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser în stare brută și finisată, cât și echipamentul utilizat – instalația Sisma MySint 100.

Materia primă sub formă de pulbere și protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser din aliajul pe bază de cobalt și crom au fost investigate microscopic, folosind pulberi cu o granulație diferită (grosieră $> 50 \mu\text{m}$ și un amestec de pulbere fină $< 30 \mu\text{m}$ cu pulbere grosieră) și proteze dentare realizate print topire selectivă cu laser aflate în stadii diferite de post-procesare (finisată și polisată) (Fig. 11).

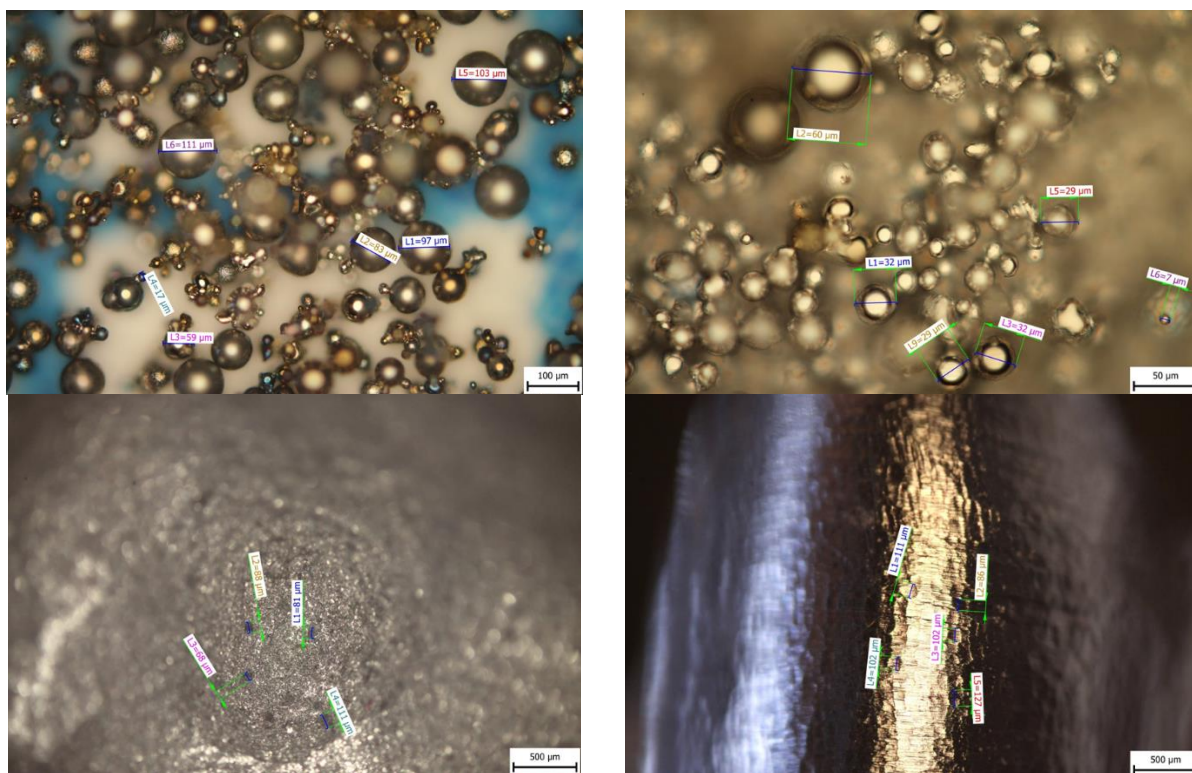


Fig. 11. Unele rezultate obținute privind imaginile microscopice ale pulberii metalice și protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser finisate și lustruite

Cercetări privind realizarea protezelor dentare prin depuneri selective cu laser și prin alte tehnologii aditive

De asemenea, am obținut mai multe modele dentare pe baza scanării intraorale digitale (Fig. 12).

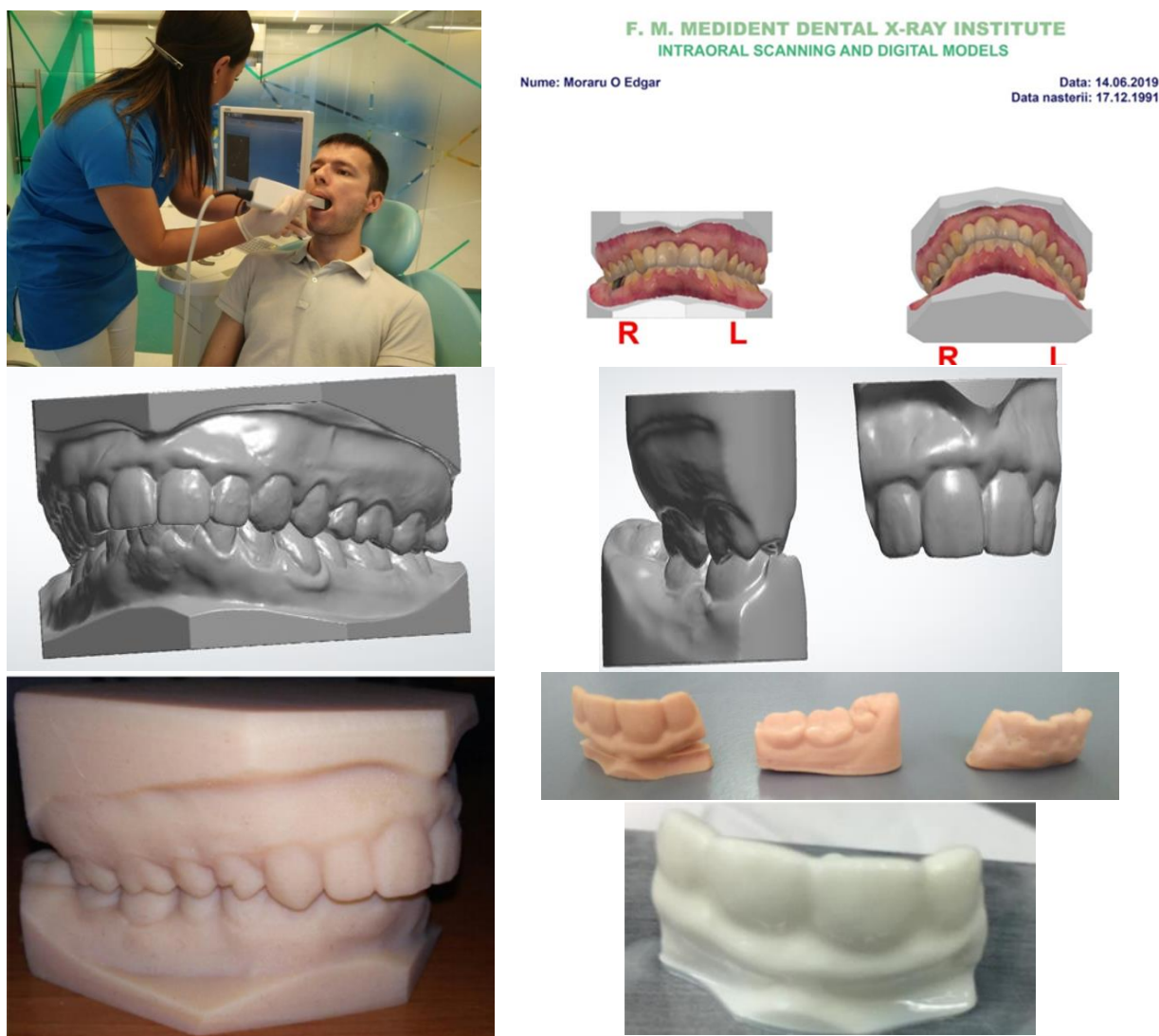


Fig. 12. Structuri protetice dentare obținute prin tehnologii aditive pe baza unei scanări digitale intraorale

Structurile dentare digitale obținute prin scanare intraorală au fost simulate numeric prin metoda elementelor finite (Fig. 13). Au fost utilizate mai multe instrumente software avansate de simulare și procesare a fișierelor digitale obținute prin scanare intraorală, inclusiv am exemplificat posibilitatea utilizării unor instrumente avansate combinate de proiectare CAD anatomică și programe de analiză CAE ingineresti (Fig. 14) [151] [152].

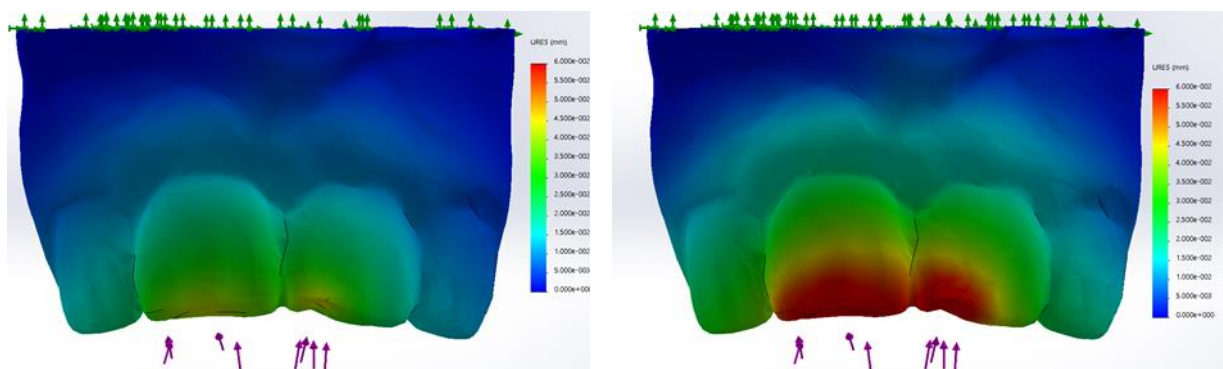


Fig. 13. Unele rezultate a analizei FEM privind deformația structurilor dentare

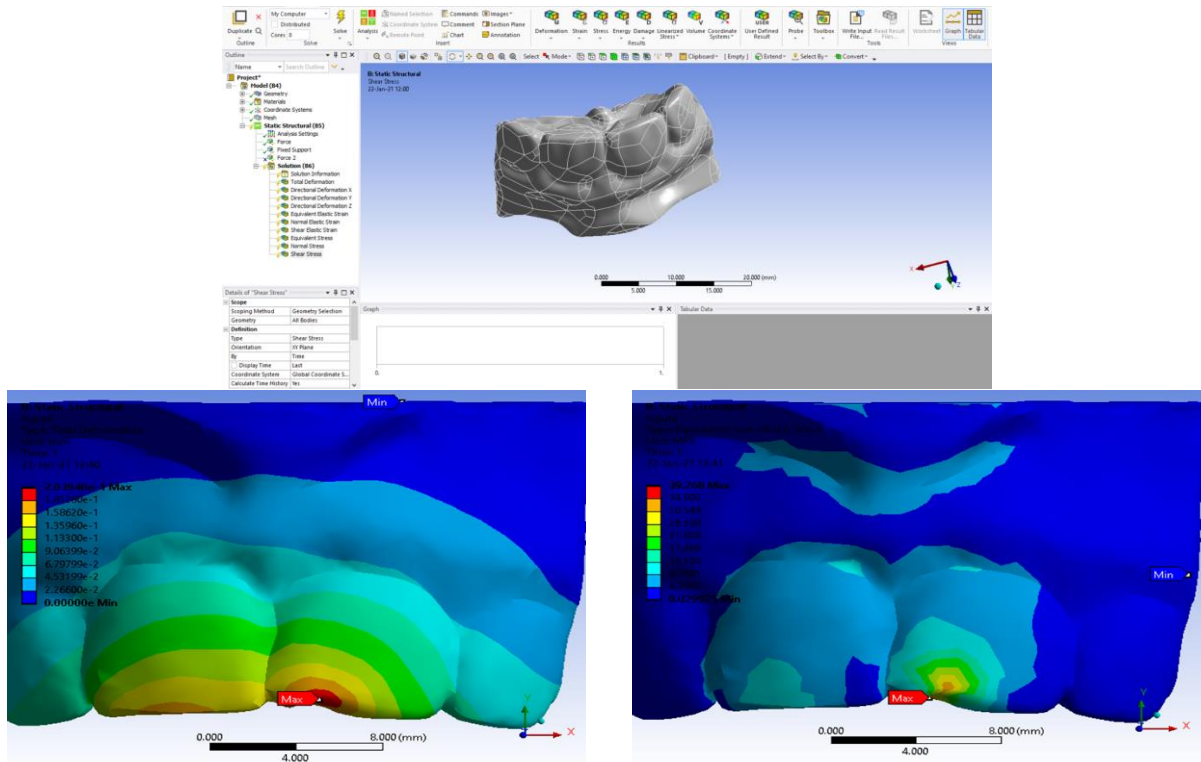


Fig. 14. Unele rezultate a analizei FEM obținute în Ansys privind deformăția structurilor dentare și tensiunea echivalentă von Mises

În **Capitolul 6 “Modelarea matematică a procesului de topire selectivă cu laser”** am prezentat modelul matematic dezvoltat privind analiza termică a procesului de topire selectivă cu laser la realizarea protezelor dentare, pentru a determina modul în care influențează parametrii de proces asupra rezultatului final proteza realizată. Am prezentat un model matematic privind caracteristicile termice ale tehnologiei aditive prin topire selectivă cu laser, în urma căruia se vor deduce temperatura în funcție de timp, rata de răcire, cât și accelerația termică în timpul procesului de topire. Am analizat pe trei biomateriale diferite utilizate în protetica dentară – aliajul de titan, aliajul pe bază de cobalt-crom și oțelul inoxidabil 316L. De asemenea, am analizat influența unor parametri importanți asupra caracteristicilor termice cu scopul de a obține proteze dentare cu proprietăți și caracteristici cât mai performante [57] [153] [155] [158] [159] [162].

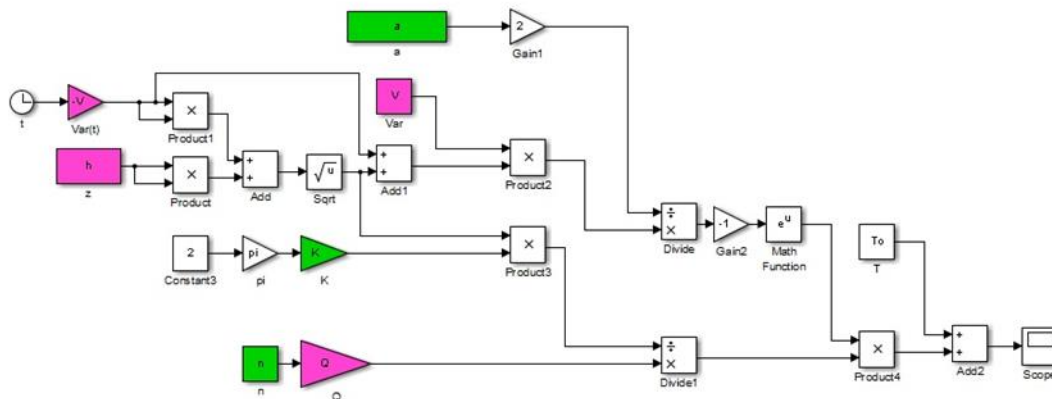


Fig. 15. Schema bloc a modelului matematic pentru transferul de căldură în timpul procesului de topire selectivă cu laser [158]

Unele rezultate obținute privind modelarea matematică a procesului de topire selectivă cu laser sunt prezentate în fig. 16, iar unele rezultate privind studiul influenței unor parametri de proces asupra temperaturii biometalelor în timpul procesului de topire selectivă cu laser sunt prezentate în fig. 17.

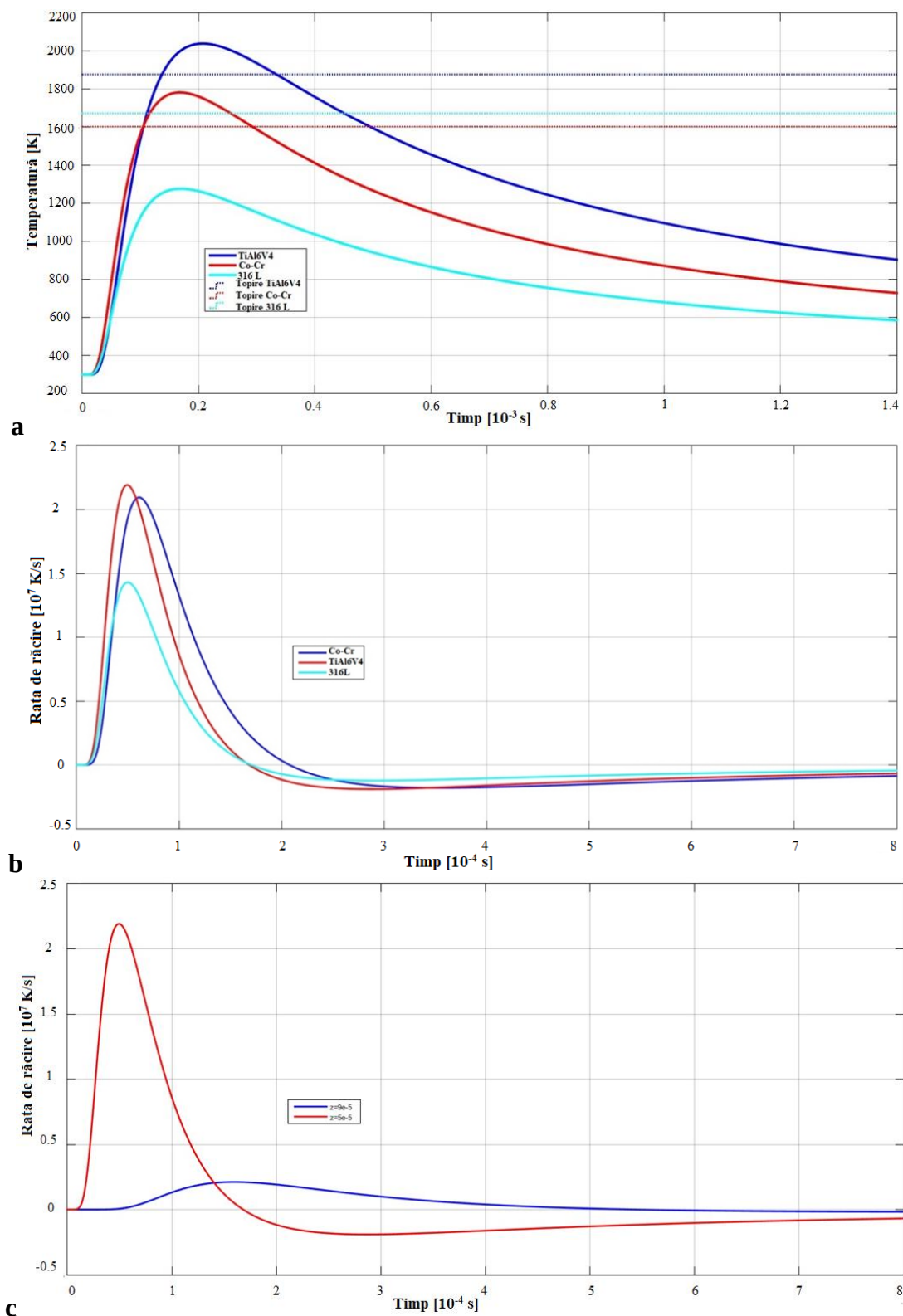


Fig. 16. Temperatura în funcție de timp calculată pentru diferite biometale în timpul procesului de topire selectivă cu laser (a), rata de răcire calculată pentru diferite biometale dentare (b) și rata de răcire în funcție de timp calculată pentru Co-Cr la $z=40\ \mu\text{m}$ și $z=90\ \mu\text{m}$ (grosime strat)

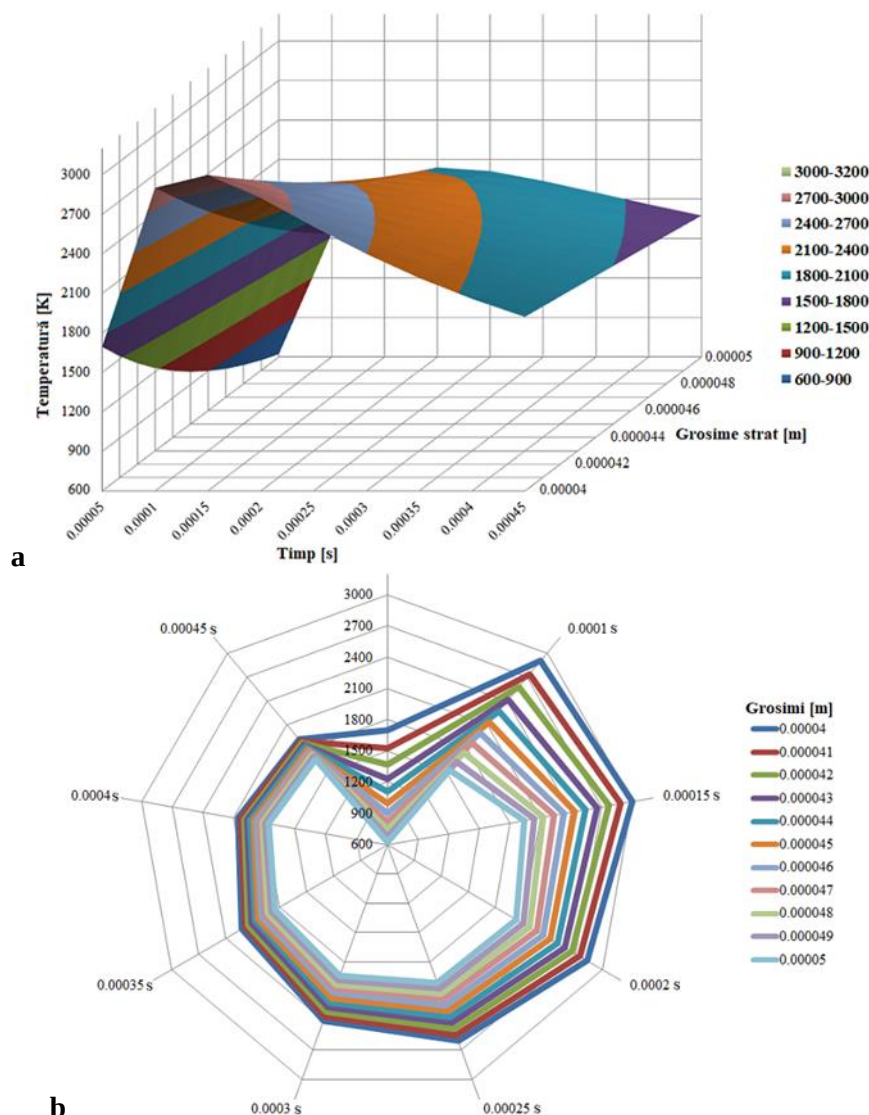


Fig. 17. Unele rezultate privind studiul influenței unor parametri de proces asupra temperaturii biometaletelor în timpul procesului de topire selectivă cu laser: a - Temperatura calculată în funcție de timp și grosimea stratului pentru TiAl6V4; b - Distribuția temperaturii în timp pentru diferite grosimi ale stratului de pulberi pentru TiAl6V4

Această modelare matematică demonstrează că aliajul de titan și aliajul pe bază de cobalt-crom au proprietăți termice mai bune și sunt mai ușor de procesat prin topire selectivă cu laser, comparativ cu oțelul inoxidabil, care are nevoie de un consum mai mare de energie pentru a putea fi prelucrat în condiții optime. Studiul din acest capitol poate reprezenta o soluție teoretică pentru determinarea caracteristicilor termice din timpul procesului topirii selective cu laser. Pe baza modelării transferului de căldură, cât și pe baza studiului influenței unor parametri de proces asupra temperaturii din timpul topirii selective cu laser se poate concluziona că, deoarece metalele studiate au proprietăți termice și fizice foarte diferite, comportamentul lor în timpul procesării prin topire selectivă cu laser este semnificativ diferit, studiul proprietăților materialelor fiind foarte important pentru a obține proteze dentare cu caracteristici cât mai performante [158].

În **Capitolul 7** intitulat „**Rezultate ale cercetărilor experimentale privind caracteristicile și proprietățile protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser și prin alte tehnologii aditive**” se prezintă caracterizarea protezelor dentare obținute prin topire selectivă cu laser, cât și a modelelor protetice dentare realizate prin extrudare termoplastică și fotopolimerizare în cuvă folosind echipamente și sisteme de analiză moderne. Am studiat comportamentul mecanic ale structurilor dentare la diverse solicitări, precizia,

starea suprafețelor, compoziția chimică, rezistența la uzură și unele proprietăți mecanice, comparând materialele, tehnologiile și echipamentele cu ajutorul cărora elementele protetice dentare au fost realizate.

În subcapitolul 7.1 am prezentat comportarea modelelor protetice dentare din diferite materiale și realizate prin tehnologii aditive diferite, care au fost supuse unor solicitări mecanice [165] [166] [167]. Pentru a studia comportarea mecanică la diverse solicitări de compresiune s-a folosit un traductor de forță din cadrul standului experimental Imada, utilizând mai multe tipuri de accesorii și testând mai multe materiale și tehnologii care pot fi utilizate la execuția modelelor protetice dentare (Fig. 18).

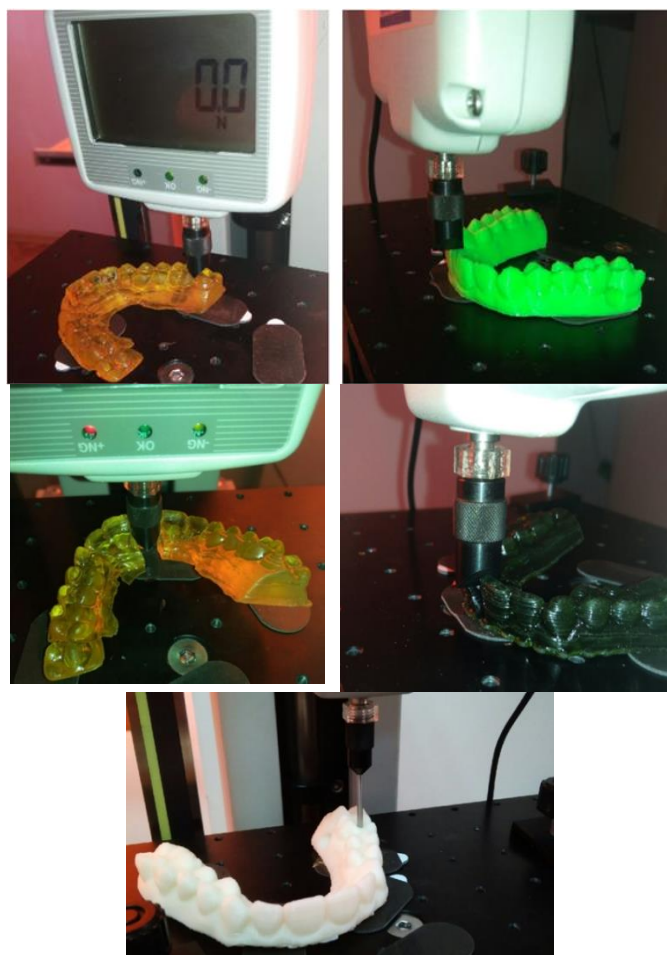


Fig. 18. Modele protetice dentare pe standul de testare

Aceste modele protetice dentare realizate prin tehnologii aditive pot fi utilizate la diagnosticarea corectă și alegerea terapiei adecvate, îmbunătățind comunicarea între diferitele echipe de specialiști sau dialogul între medicul stomatolog și pacient. De asemenea, modelul fizic tridimensional poate fi utilizat în planificarea unor intervenții chirurgicale cu un grad ridicat de complexitate, care pot fi exersate pe aceste modele sau pentru a le folosi în scop didactic pentru viitorii specialiști în domeniu.

Mai multe modele protetice dentare realizate prin diverse tehnologii aditive diferite au fost supuse unor solicitări mecanice de compresiune în două zone diferite. Au fost determinate săgețile maxime, cât și forța la care s-au obținut acestea. Cum și era de așteptat prototipurile termoplastice sunt mai rezistente din punct de vedere mecanic, ABS demonstrând utilitatea sa în multe aplicații ingineresti. La fel de rezistent s-a dovedit a fi și materialul biocompatibil, care în condiții optime de imprimare ar putea servi chiar și ca proteze provizorii. La modelele protetice dentare din PETG se obțin deformările maxime. La modelele protetice din rășină fotopolimerică s-a obținut ruperea în zona incisiv centrală la

Cercetări privind realizarea protezelor dentare prin depuneri selective cu laser și prin alte tehnologii aditive

aproximativ 350 N. Unele rezultate obținute privind comportarea mecanică a modelelor dentare realizate prin tehnologii aditive sunt prezentate în fig. 19.

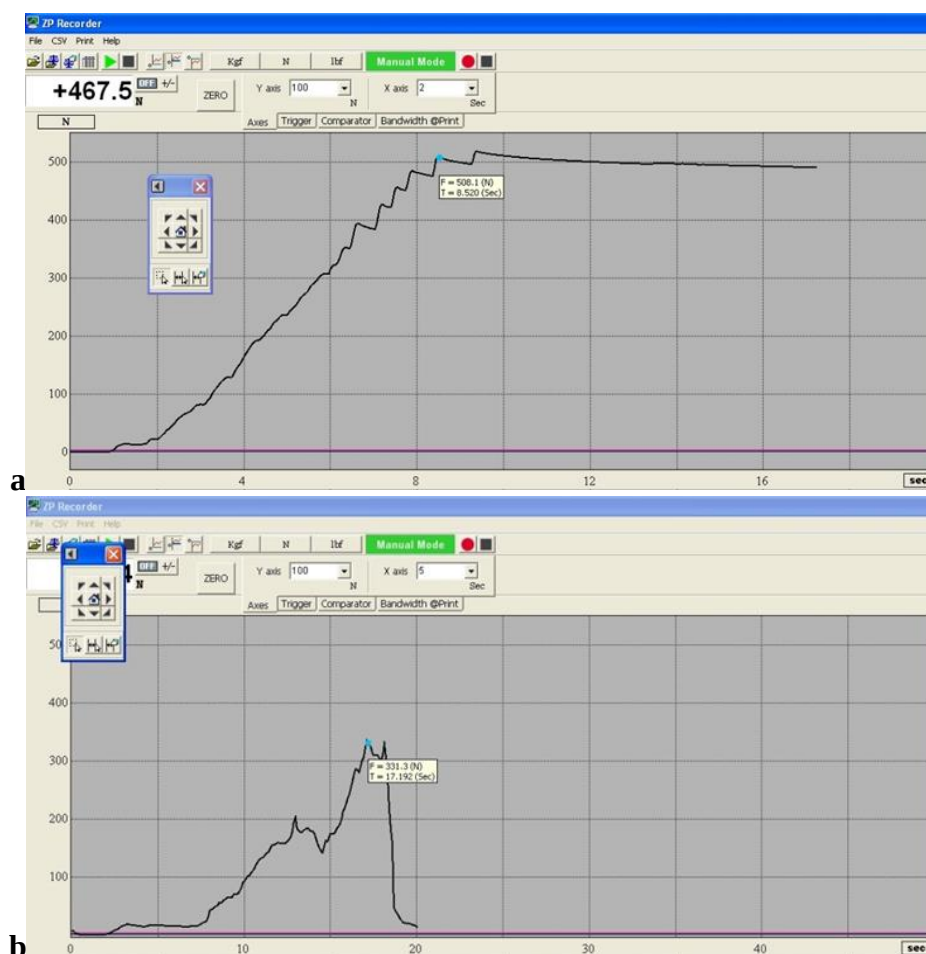


Fig. 19. Unele rezultate obținute privind comportarea mecanică a modelelor dentare realizate prin tehnologii aditive: evoluția forței în funcție de timp a prototipului dentar termoplastic din ABS pentru solicitări în zona molară – $F_{\max}=500$ N (a) și evoluția forței în funcție de timp a prototipului dentar din rășină fotopolimerică standard pentru solicitări în zona incisiv centrală (b)

De asemenea, studiul experimental privind comportamentul mecanic al modelelor dentare obținute prin diferite metode de fabricație aditivă și folosind materiale și echipamente diferite pune în evidență evoluții liniare ale caracteristicilor deformație-forță atât pentru zona incisivă, cât și pentru zona molară pentru aproape toate materialele testate, cu excepția unei regiuni din domeniul inițial al deformațiilor (în apropiere de originea sistemului de coordonate). În cazul regiunii molare s-au obținut forțe de deformare mai mari decât în cazul regiunii incisive, având în vedere structura lor. În ceea ce privește materialele utilizate, nylonul și PLA au prezentat cel mai bun comportament liniar. În general, toate tehnologiile aditive care au fost utilizate pentru realizarea modelelor protetice dentare au condus la caracteristici apropiate de cele liniare în urma testării acestora. În cazul tehnologiei FDM, un comportament aproape liniar s-a obținut doar pentru modelele protetice dentare din PLA realizate pe imprimantele Makerbot și Wanhao. PLA este un material relativ biodegradabil și a prezentat un comportament mecanic stabil, deci poate fi folosit ca model în stomatologie dacă se ia în considerare tehnologia FDM. Același lucru se poate spune despre tehnologiile SLS și DLP, cu ajutorul cărora se obțin modele mult mai precise și de calitate superioară, dar în același timp sunt mai scumpe decât cele realizate prin tehnologia FDM [166] [167]. Unele rezultate privind analiza mecanică a modelelor protetice dentare executate prin tehnologii diferite și utilizând echipamente de imprimare 3D diferite se prezintă în tabelul 1 și fig. 20.

Tabel 1. Rezultate experimentale obținute ale deformațiilor în funcție de forță în regiunea incisivă și molară pentru modelele dentare realizate prin trei tehnologii aditive diferite [167]

Nylon (SLS)				Rășină fotop. (DLP)				PLA (FDM, Makerbot)			
Regiunea incisivă		Regiunea molară		Regiunea incisivă		Regiunea molară		Regiunea incisivă		Regiunea molară	
δ (mm)	F (N)	δ (mm)	F (N)	δ (mm)	F (N)	δ (mm)	F (N)	δ (mm)	F (N)	δ (mm)	F (N)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	1,6	0,2	3,4	0,1	11	0,2	22	0,1	3	0,2	5,5
0,2	2,8	0,4	13	0,2	21	0,4	53	0,2	9,5	0,4	8
0,3	5,7	0,6	30	0,3	28	0,6	95	0,3	21	0,6	25
0,4	7,5	0,8	40	0,4	31	0,8	152	0,4	36	0,8	56
0,5	11,5	1	56	0,5	44	1	220	0,5	56	1	117
0,6	20	1,2	86	0,6	55	1,2	283	0,6	71	1,2	185
0,7	28,2	1,4	129	0,7	64	1,4	353	0,7	83	1,4	245
0,8	38	1,6	205	0,8	70	1,6	430	0,8	103	1,6	312
0,9	47	1,8	295	0,9	75			0,9	114	1,8	408
1	57	2	386	1	92			1	145		
1,1	68			1,1	98			1,1	153		
1,2	75			1,2	111			1,2	166		
1,3	90			1,3	126			1,3	180		
1,4	106			1,4	130						
1,5	118			1,5	151						
1,6	130			1,6	170						
1,7	146			1,7	182						

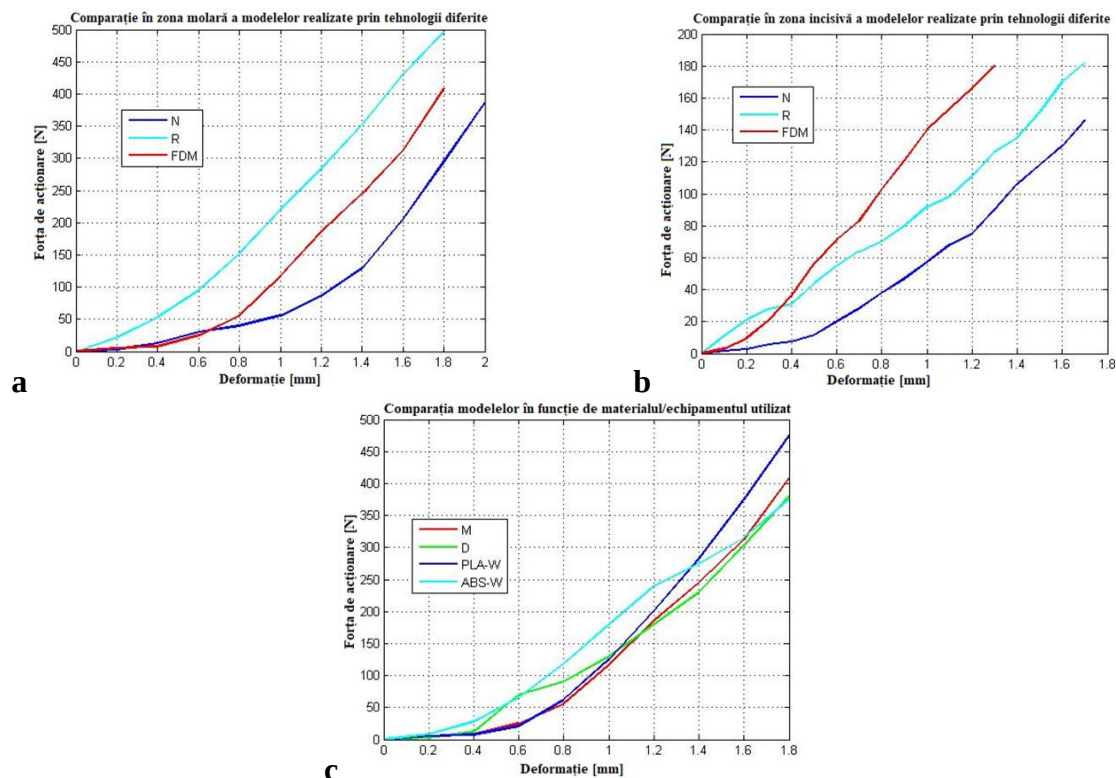


Fig. 20. Unele rezultate obținute privind analiza mecanică comparativă ale modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive: rezultate comparative în funcție de tehnologia utilizată în zona molară (a), rezultate comparative în funcție de tehnologia utilizată în zona incisivă (b), rezultate comparative a modelelor FDM în funcție de materialul și imprimanta 3D utilizată (c).

Pentru a valida rezultatele cercetărilor experimentale privind testarea la unele solicitări mecanice a modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive, acestea au fost comparate cu datele obținute în urma simulării prin analiza FEM. Pentru acest scop a fost utilizat modelul dentar a dinților incisivi obținut prin scanare intraorală digitală care a fost simulat în cap. 5.8, iar ulterior au fost printate mai multe modele (PLA) care au fost supuse la solicitări de compresiune utilizând un accesoriu cu o formă a vârfului aproximativ similară cu zona de acționare a forțelor în simularea din Ansys. Au fost obținute rezultate relativ apropiate între deformațiile modelelor dentare obținute pe cale experimentală și teoretic numerică, fapt ce validează metodele de cercetare utilizate (Fig. 21).

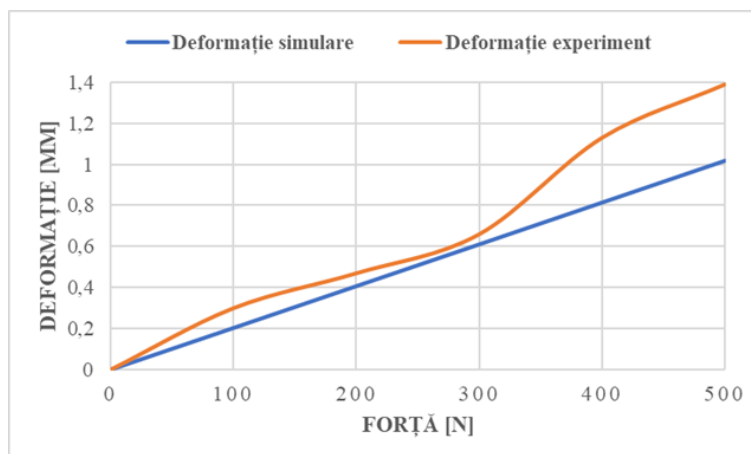


Fig. 21. Compararea rezultatelor experimentale cu cele ale simulării privind deformația modelelor protetice dentare

Scopul cercetărilor din subcapitolul 7.2 a fost de a estima cele mai potrivite materiale din punct de vedere al rezistenței la uzură pentru realizarea unor modele protetice dentare prin tehnologia extrudării termoplastice FDM [171]. Pentru a putea estima uzura materialelor termoplastice utilizate pentru realizarea unor modele protetice dentare, au fost realizate opt roți dințate cu același modul și număr de dinți prin tehnologia FDM din următoarele materiale: 3 din PLA, 3 din ABS și câte una din PETG cu fibră de carbon și nylon. Pentru a determina uzura dinților roților dințate care necesită o funcționare continuă și constantă, a fost proiectat și realizat un stand demonstrativ pentru a evidenția gradul de uzură în urma funcționării continue ale celor opt roți dințate realizate prin tehnologii aditive.

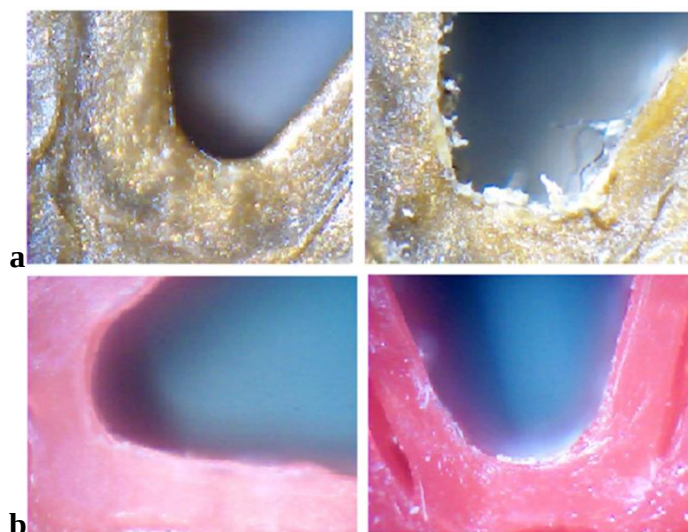


Fig. 22. Unele rezultate obținute în urma cercetărilor privind rezistența la uzură: comparația materialelor termoplastice înainte și după testare – ABS (a) și PLA (b)

PLA s-a dovedit a fi cel mai performant din punct de vedere al rezistenței la uzură și din această perspectivă poate fi considerat cel mai potrivit material pentru realizarea modelelor protetice dentare prin tehnologii de fabricație aditivă. În ciuda unor proprietăți mecanice mai bune ale structurilor din ABS imprimate, acestea sunt mai uzate după un ciclu de utilizare continuă decât elementele din PLA. Concluziile deduse după această cercetare experimentală [171] privind uzura materialelor termoplastice obținute prin tehnologii aditive poate fi utilă la alegerea soluției optime pentru realizarea unor modele dentare cu aplicații specifice în stomatologie.

Referitor la precizia dimensională ale modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive (subcapitol 7.3.1), pentru a compara materialele, tehnologiile aditive și echipamentele utilizate la realizarea modelelor dentare în ceea ce privește precizia dimensională, cât și reproductibilitatea sau repetabilitatea acestora, am proiectat și realizat piese relativ simple cu aceleași caracteristici dimensionale, prezentate în fig. 23, care spre deosebire de modelele protetice dentare pot fi studiate și testate după proceduri standard cunoscute.

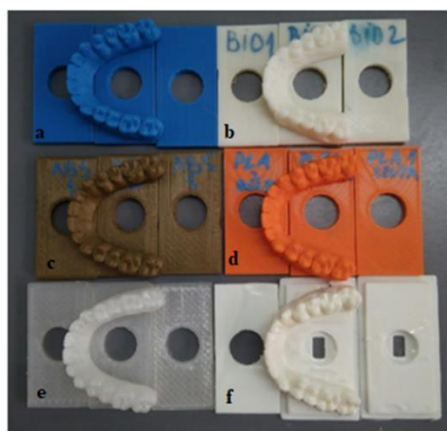


Fig. 23. Piese test realizate: a – PLA (MakerBot), b – ABS biocompatibil (Wanhao), c – ABS (Wanhao), d – PLA (Delta), e – PLA (Wanhao), f – rășină fotopolimerică

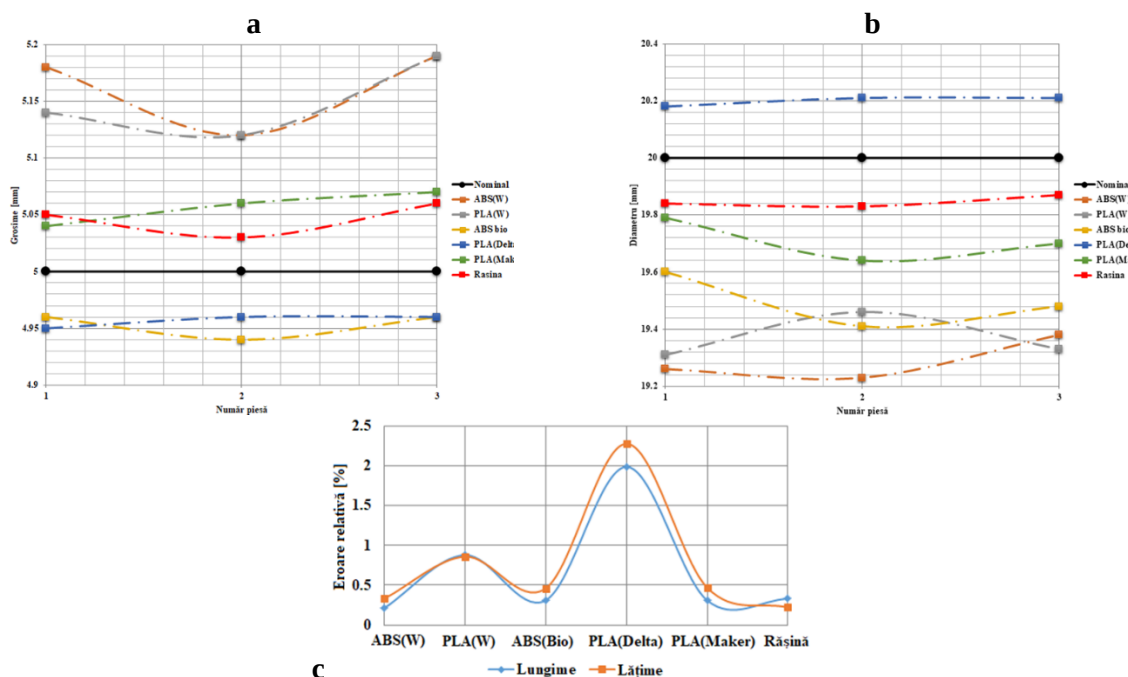
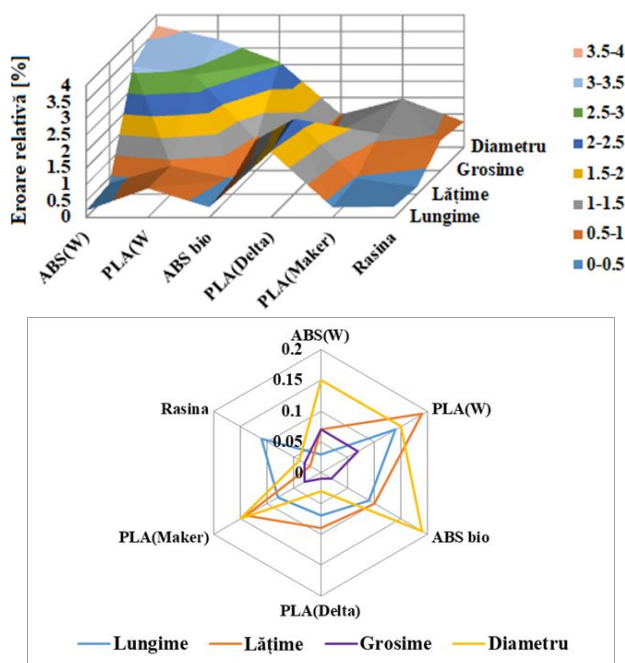


Fig. 24. Unele rezultate obținute privind precizia dimensională a modelelor protetice dentare: dimensiuni măsurate ale grosimii și diametrului (a și b) comparativ cu dimensiunea nominală, comparația erorilor relative medii pentru lungime și lățime (c)

Tabel 2. Valori măsurate pentru piesele test

Material	Nr	Lungime Nominal 70 mm		Latime Nominal 35 mm		Grosime Nominal 5 mm		Diametru Nominal 20 mm	
		Valoare [mm]	Eroare [%]	Valoare [mm]	Eroare [%]	Valoare [mm]	Eroare [%]	Valoare [mm]	Eroare [%]
ABS Wanhao	1	69.87	0.19	35.08	0.22	5.18	3.47	19.26	3.84
	2	69.85	0.21	35.12	0.34	5.12	2.34	19.23	4
	3	69.84	0.23	35.15	0.43	5.19	3.66	19.38	3.20
Eroare medie		0.21		0.33		3.16		3.68	
ABS Medical	1	69.8	0.29	34.79	0.6	4.96	0.8	19.6	2.04
	2	69.73	0.39	34.84	0.46	4.94	1.21	19.41	3.04
	3	69.82	0.26	34.89	0.32	4.96	0.8	19.48	2.67
Eroare medie		0.31		0.46		0.94		2.58	
PLA Wanhao	1	69.32	0.98	34.74	0.75	5.14	2.72	19.31	3.57
	2	69.46	0.78	34.78	0.63	5.12	2.34	19.46	2.77
	3	69.39	0.88	34.59	1.19	5.19	3.66	19.33	3.47
Eroare medie		0.88		0.86		2.9		3.27	
PLA Delta	1	71.45	2.03	35.86	2.4	4.95	1.01	20.18	0.89
	2	71.43	2	35.77	2.15	4.96	0.8	20.21	1.04
	3	71.38	1.93	35.82	2.29	4.96	0.8	20.21	1.04
Eroare medie		1.99		2.28		0.87		0.99	
PLA Maker	1	70.22	0.31	35.08	0.22	5.04	0.79	19.79	1.06
	2	70.18	0.26	35.2	0.56	5.06	1.18	19.64	1.83
	3	70.26	0.37	35.22	0.62	5.07	1.38	19.7	1.52
Eroare medie		0.31		0.47		1.12		1.47	
Rășină	1	70.25	0.35	35.07	0.2	5.05	0.99	19.84	0.81
	2	70.28	0.4	35.09	0.26	5.03	0.6	19.83	0.86
	3	70.17	0.24	35.07	0.2	5.06	1.18	19.87	0.65
Eroare medie		0.33		0.22		0.92		0.77	

**Fig. 25.** Unele rezultate obținute privind precizia dimensională a modelelor protetice dentare: comparația erorilor relative medii (a) și diagrama de tip radar pentru reproductibilitate (b)

Acest studiu poate fi util pentru selecția materialului optim pentru modelele dentare cu aplicații specifice care necesită o precizie ridicată. Ca material, rășina fotopolimerică dă cele

mai bune rezultate ca precizie dimensională, ceea ce era de așteptat. Ca echipament, se poate evidenția imprimanta MakerBot cu erori relative medii constante și acceptabile, iar Delta și Wanhao Duplicator 4S prezentând probleme la anumite dimensiuni în legătură cu precizia dimensională. Aceste probleme pot fi soluționate prin calibrarea imprimantelor sau verificarea duzei de extrudare privind înfundarea minoră sau setarea din program a unei valori mai mici pentru grosimea stratului depus.

În general s-au obținut erori relative medii acceptabile în majoritatea cazurilor cu valori apropiate de alte studii din literatura de specialitate [173].

În subcapitolul 7.3.2 se prezintă stabilirea domeniilor de temperatură pentru tehnologiile aditive utilizate pentru realizarea modelelor protetice dentare [175]. În cap. 7.3.1 am evidențiat abaterile dimensionale existente de la cele nominale pentru piesele realizate prin extrudare termoplastică, iar o posibilă cauză pentru apariția acestor abateri este contracția materialului în procesul de răcire, de aceea trebuie cercetat felul în care materialul se răcește după ce a fost executat prin intermediul acestei tehnologii. Pentru scopurile descrise mai sus am folosit o cameră termică FLIR (Fig. 26).

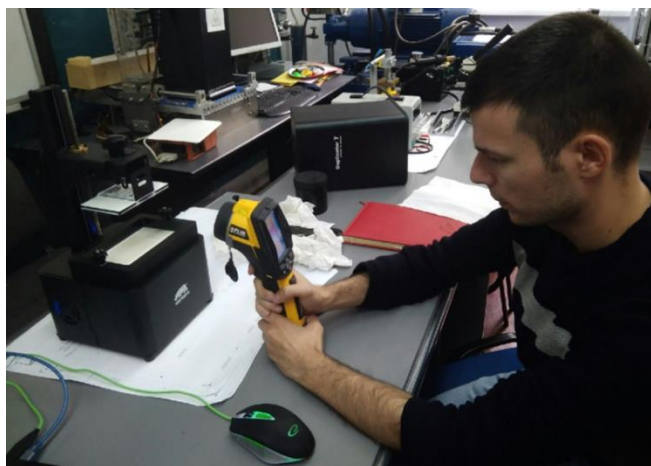


Fig. 26. Stabilirea temperaturii cu ajutorul camerei termice FLIR

Unele rezultate ale analizei termografice ale modelelor protetice dentare sunt prezentate în fig. 27.

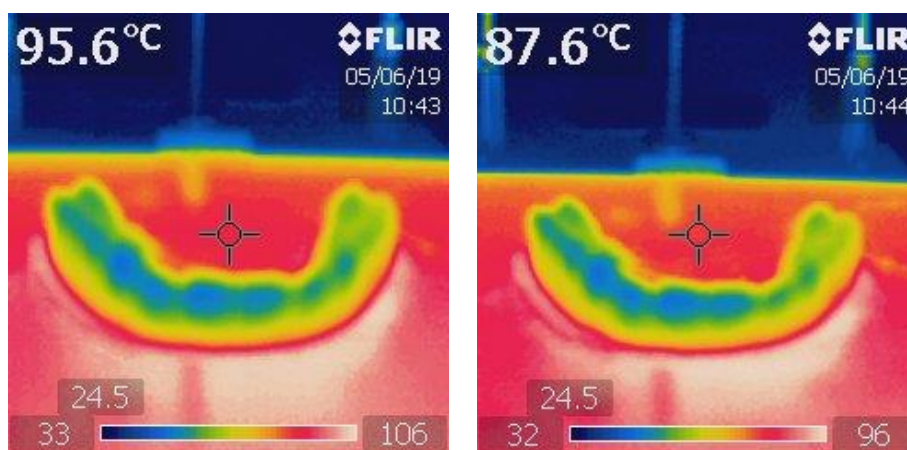


Fig. 27. Imagini termice ale modelelor dentare după finalizarea procesului de imprimare

Printre cercetările din acest subcapitol s-a numărat studiul modului în care structura imprimată se răcește: după terminarea imprimării, am făcut capturi pentru modelul dentar la fiecare 5 secunde timp de un minut, pentru a vedea felul în care materialul se răcește în timp. Din meniul “Analyze” a programului am setat trei puncte de interes: platforma de lucru, zona incisiv centrală și zona molară, iar rezultatele obținute se prezintă în fig. 28.

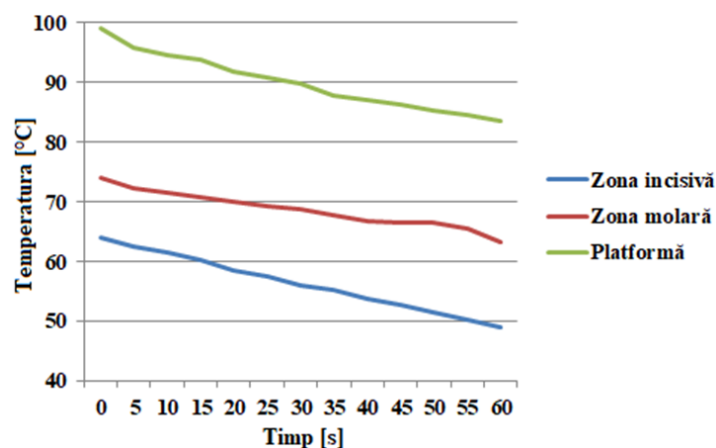


Fig. 28. Temperatura în funcție de timp după finalizare imprimării în cele 3 zone de interes

Având în vedere rezultatele obținute în cap. 7.3.1 privind precizia dimensională a elementelor realizate prin tehnologii aditive, în subcapitolul 7.3.3 am realizat un studiu experimental în ceea ce privește grosimea straturilor depuse a modelelor obținute prin extrudare termoplastică pentru a demonstra posibila cauză de apariție a erorilor dimensionale (pe axa z – grosime) și a vedea care sunt abaterile reale de la grosimea nominală impusă în software-ul echipamentului înainte de realizare. Pentru acest scop am investigat piesele test tratate în cap.7.3.1, după cum urmează: ABS, PLA și ABS biocompatibil printate pe imprimanta Wanhao (grosime nominală strat 0,27 mm), PLA pe imprimantele Delta și Makerbot (în ambele cazuri grosimea nominală strat 0,2 mm). Echipamentul utilizat a fost Nikon iNEXIV VMA-2520 (Fig. 29).

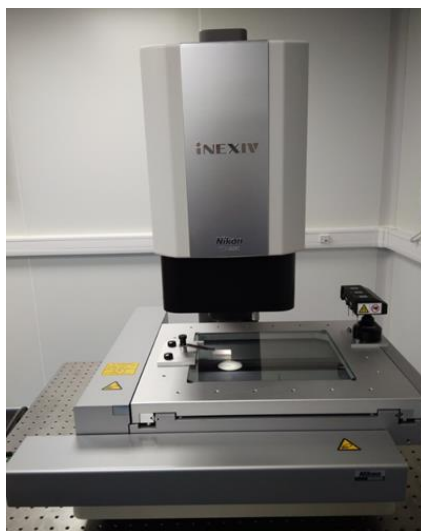


Fig. 29. Sistemul de măsurare Nikon iNEXIV VM-2520 utilizat pentru determinarea grosimii straturilor depuse

Pentru toate piesele investigate au fost măsurate și estimate câte zece grosimi ale straturilor depuse consecutiv pentru fiecare, iar în fig. 30 prezint unele rezultate pentru aceste determinări, observându-se din software-ul echipamentului imaginea microscopică a reperelor studiate în stânga și calculul grosimilor pentru cele zece straturi în dreapta.

În urma determinării grosimii straturilor pentru cele cinci repere și cu scopul de a compara rezultatele obținute, am calculat câțiva parametri importanți care vor descrie și estima felul în care straturile au fost depuse, iar în tabelul 3 și fig. 31 am prezentat toate rezultate obținute și parametrii determinați pe baza acestor rezultate.

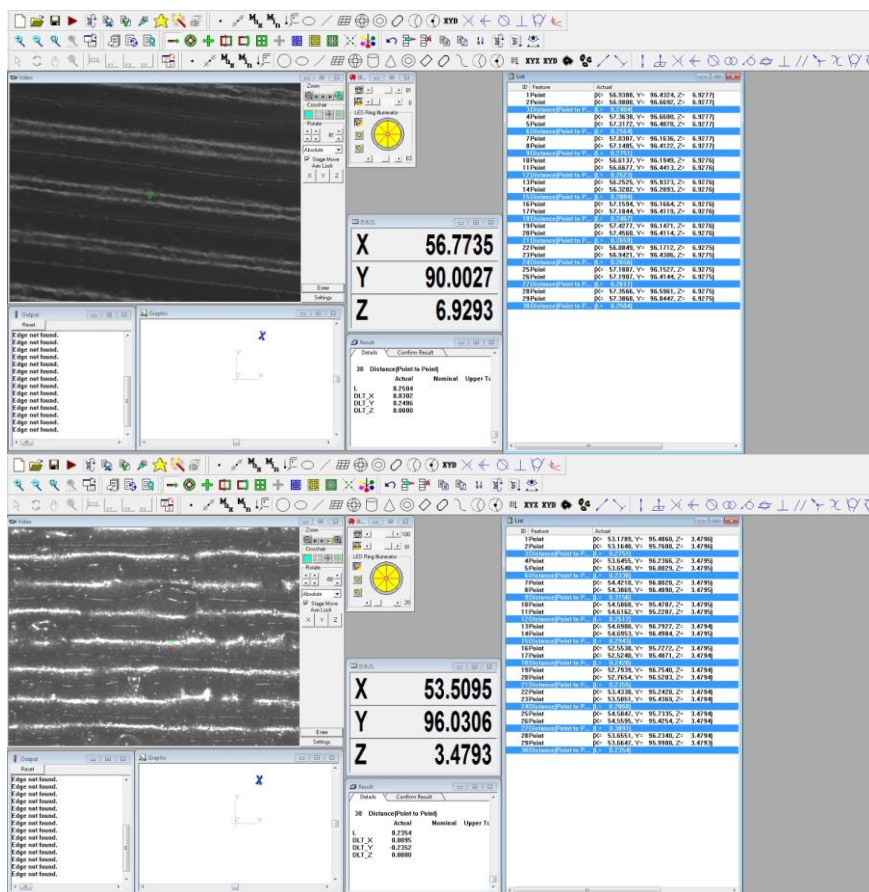


Fig. 30. Unele rezultate obținute privind determinarea grosimii straturilor depuse

Tabel 3. Rezultate ale determinărilor grosimilor straturilor depuse

Strat	Material (imprimantă), grosime nominală strat				
	ABS bio (Wanhao) 0,27 mm	ABS (Wanhao) 0,27 mm	PLA (Wanhao) 0,27 mm	PLA (Delta) 0,2 mm	PLA (Makerbot) 0,2 mm
1	0,2502	0,2751	0,2404	0,2110	0,2062
2	0,2658	0,2338	0,2564	0,1929	0,2051
3	0,2666	0,3156	0,2751	0,1920	0,1964
4	0,2718	0,2943	0,2523	0,2100	0,1951
5	0,2676	0,2420	0,2804	0,2142	0,2003
6	0,2691	0,2355	0,2467	0,2212	0,2037
7	0,2622	0,2068	0,2659	0,1836	0,1919
8	0,2663	0,3091	0,2656	0,1818	0,1971
9	0,2700	0,2354	0,2617	0,2053	0,1924
10	0,2646	0,2355	0,2504	0,2230	0,2126
Xmed	0,2654	0,2583	0,2595	0,2035	0,2001
ϵ_{rm} [%]	1,7	4,32	3,89	1,75	0,05
Amax	-0,0198	-0,0632	-0,0296	0,023	0,0126
D	0,0216	0,1088	0,04	0,0412	0,0207
σ^2	0,0000361	0,00139	0,000159	0,000224	0,000045
σ	0,006	0,0373	0,0126	0,0149	0,00671

În urma acestui studiu se poate estima și compara variația valorilor grosimii straturilor depuse față de dimensiunea nominală și varianța față de tendința centrală a acestora, putând aprecia cel mai omogen material pentru a obține valori ale grosimii straturilor cât mai

apropiate de dimensiunea nominală și distribuite apropiat față de media acestora cu scopul de a alege cel mai bun material din acest punct de vedere și de a obține modelul final cu caracteristici dimensionale adecvate. Pentru a avea rezultate mai concludente și a evita posibilele erori aleatorii, se pot face determinări pentru eșantioane de grosimi mai mari, acest studiu având ca scop principal comparația materialelor și echipamentelor utilizate pentru realizarea unor piese prin extrudare termoplastică.

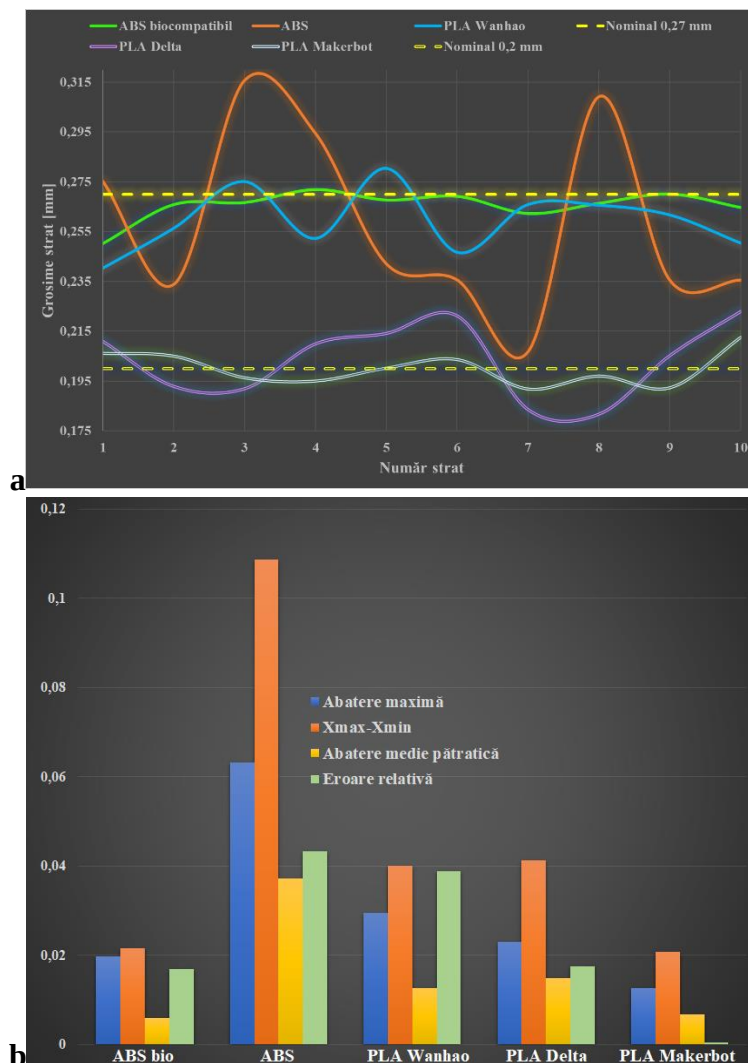


Fig. 31. Comparația grosimilor straturilor determinate (a) și comparația parametrilor stabiliți în urma determinării grosimii straturilor (b)

Având în vedere modul în care influențează rugozitatea suprafețelor protezelor dentare performanța în timp ale acestora, am determinat în subcapitolul 7.3.4 microtopografia suprafețelor protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser în stare brută, finisată și lustruită pe cale mecanică (cu particule abrazive) [181], materialul fiind aliajul pe bază de cobalt-crom-wolfram, iar caracterizarea topografică a acestora a fost efectuată cu ajutorul unui microscop de forță atomică NTEGRA Probe NanoLaboratory NT-MDT [182] (Fig. 32).

Determinările nanorugozității și caracterizarea microtopografiei suprafețelor a fost efectuată prin intermediul microscopului de tip AFM prin scanarea unor zone de 35x35 μm situate în diferite locuri de pe suprafața celor trei proteze dentare investigate aflate în diverse stadii de post-procesare (în total au fost investigate câte 10 zone diferite pentru cele trei proteze dentare), iar parametrii de interes au fost determinați prin intermediul software-ului echipamentului utilizat NOVA SPM.

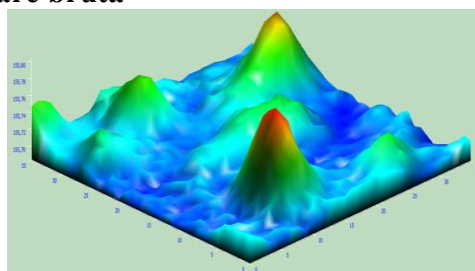
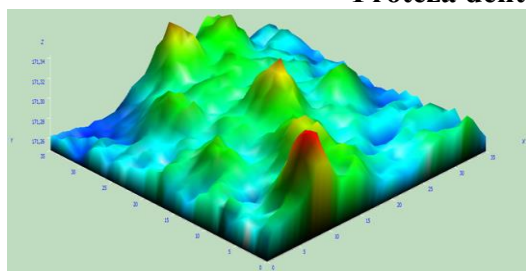
Pentru cele trei proteze investigate aflate în stadii de post-procesare diferite au fost

luate în considerare principalii parametri de rugozitate: abaterea medie aritmetică a suprafețelor, abaterea medie pătratică și distanța dintre extremitățile neregularităților (vârful cel mai înalt, respectiv golul cel mai adânc). Având în vedere că măsurările nu vor aborda doar profilul suprafeței, ci cazuri bidimensionale – se vor nota cu S_a – abaterea medie aritmetică, S_q abaterea medie pătratică și S_y distanța dintre extremitățile neregularităților/asperităților, fiind parametri areali în cazul de față echivalenți cu cei a profilului. Unele imagini microtopografice pentru protezele aflate în stadii diferite de post-procesare se prezintă în fig. 33.

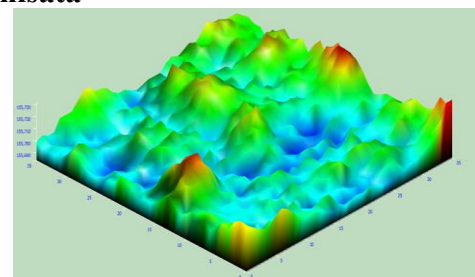
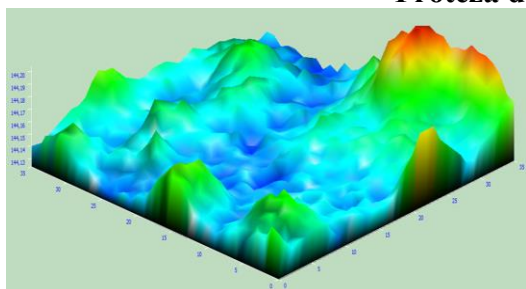


Fig. 32. Determinarea nanorugozității protezelor dentare pe microscop de tip AFM

Proteză dentară în stare brută



Proteză dentară finisată



Proteză dentară lustruită

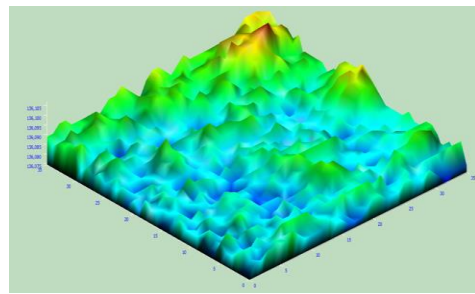
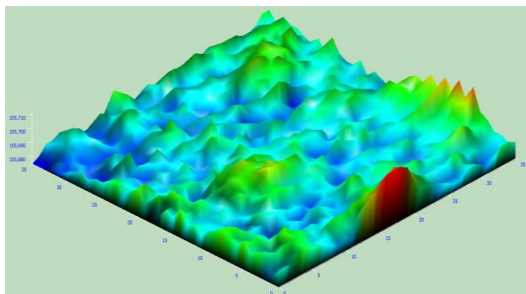


Fig. 33. Unele imagini microtopografice obținute pentru suprafețele protezelor dentare (35x35 μm)

În tabelul 4 am prezentat parametrii determinați pentru abaterea medie aritmetică, distanța dintre extremitățile neregularităților și abaterea medie pătratică a suprafețelor de 35x35 μm a protezelor dentare aflate în stadii diferite de post-procesare, iar în fig. 34 un studiu grafic comparativ pentru valorile medii ale abaterilor medii aritmetice și pătratice obținute în urma determinării microtopografiei suprafețelor pentru cele trei tipuri de proteze.

Tabel 4. Parametri de rugozitate determinați pentru proteze dentare în diferite stadii de prelucrare

Nr. Crt.	<i>Proteză în stare brută</i>			<i>Proteză finisată</i>			<i>Proteză lustruită</i>		
	S_a [nm]	S_y [nm]	S_q [nm]	S_a [nm]	S_y [nm]	S_q [nm]	S_a [nm]	S_y [nm]	S_q [nm]
1	13,90	125,61	19,60	6,41	48,58	8,16	3,31	25,42	4,09
2	11,58	97,41	15,16	7,22	57,69	9,20	4,36	32,68	5,44
3	16,49	128,18	21,65	7,02	62,87	9,32	3,78	32,68	5,07
4	16,73	114,17	20,67	6,48	69,15	8,72	2,11	36,76	4,93
5	16,53	120,16	21,03	9,15	81,30	12,66	2,77	36,76	5,45
6	11,06	93,46	14,20	7,39	81,30	10,12	3,55	35,51	6,58
7	13,30	121,46	18,20	7,73	111,79	11,24	2,42	30,04	4,84
8	13,71	189,70	22,24	8,47	102,54	11,94	2,53	57,35	5,91
9	15,43	123,48	20,34	8,84	74,34	11,64	3,40	28,20	4,24
10	12,82	114,72	16,93	8,20	106,52	14,49	4,19	39,48	5,67
Medie	14,15	122,83	19,00	7,69	79,61	10,75	3,24	35,49	5,22

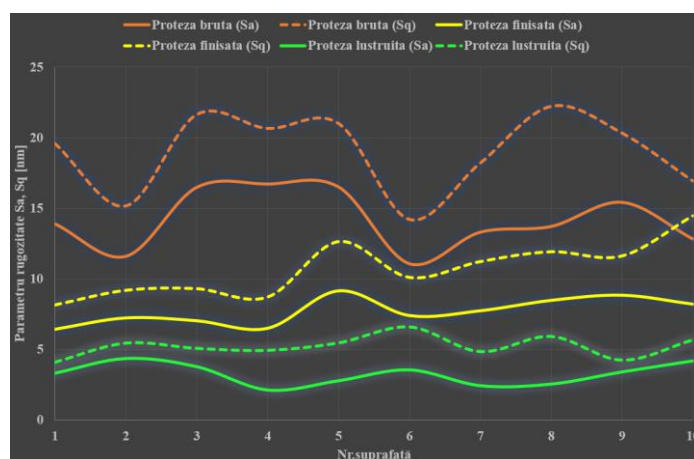


Fig. 34. Comparația parametrilor de rugozitate (S_a și S_q) stabiliți în urma determinării microtopografiei suprafețelor

Având în vedere că rugozitatea suprafețelor protezelor dentare influențează formarea plăcii bacteriene și a altor posibile dezvoltări bacteriene sau a altor microorganisme nocive, dar și că valorile mici ale rugozității contribuie la sporirea unor caracteristici mecanice importante, acest studiu la nivel micro sau nanometric poate fi util pentru evaluarea eficienței

procedeului de post-procesare și de a alege metoda optimă de finisare pentru a obține rezultate corespunzătoare și de a scădea șansa efectelor negative de natură biologică sau mecanică asupra protezei dentare și implicit a pacientului.

Pentru cercetările experimentale din subcapitolul 7.3.5 privind analiza macrostructurală [188] a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser s-au utilizat proteze dentare realizate prin topire selectivă cu laser din două materiale diferite: aliaj pe bază de CoCrW și aliaj pe bază de NiCr. În cazul protezelor metalice sau metalo-ceramice este foarte important ca procesarea suprafețelor metalice să fie realizată într-un mod adecvat din mai multe considerente: creșterea rezistenței la uzură, rezistenței chimice și a durabilității, diminuarea potențialului electrolitic, îmbunătățirea proprietăților mecanice și reducerea microdefectelor de suprafață, îmbunătățirea întreținerii igienice ale protezelor dentare și diminuarea aderenței diverselor specii microbiene la suprafața protezelor, creșterea aderenței stratului estetic de acoperire la suprafața metalică. Pentru studiul din acest subcapitol și a pune în evidență aparența protezelor dentare au fost alese trei mărimi din domeniul macroscopic pentru stereomicroscopul utilizat - 6,3x, 10x și 15x.

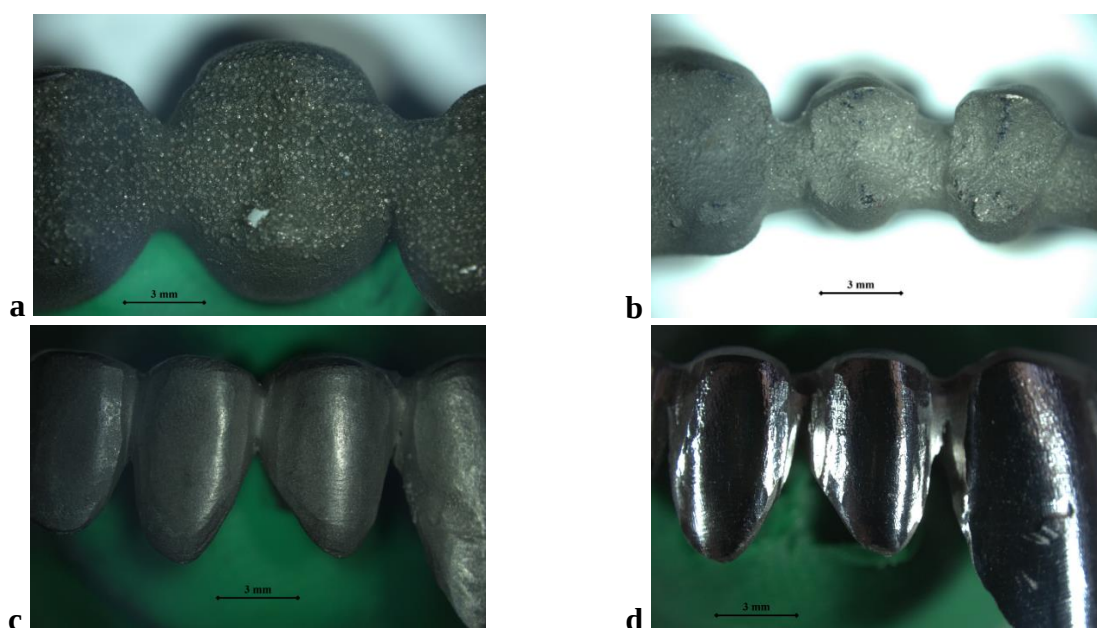


Fig. 35. Unele rezultate obținute privind analiza macroscopică a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser aflate în diverse stadii de postprocesare (mărimi 15x) : stare brută – aliaj CoCr (a) și aliaj NiCr (b), finisată (c) și lustruită (d)

Spre deosebire de examinarea microscopică, analiza macroscopică nu determină detaliile structurii și este adesea o etapă preliminară, și nu finală de analiză structurală. Macroanaliza poate permite alegerea anumitor zone care necesită o examinare microscopică suplimentară și se pot obține informații importante în legătură cu: calitatea protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser aflate în diverse stadii de post-procesare, identificarea anumitor defecte ca discontinuitatea structurală sau eterogenitatea chimică, studierea preliminară a influenței operațiilor de finisare asupra aspectului protezelor dentare și alegerea unei zone de interes pentru investigațiile microscopice/microstructurale mai avansate.

Pentru scopul cercetărilor privind analiza elementală prin spectroscopie dispersivă cu raze X a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser din subcapitolul 7.4 am utilizat sistemul de microscopie electronică cu baleiaj SEM/EDS Phenom ProX [195] [201]. La analiza elementală a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser am luat în considerare două materiale diferite: pe bază de cobalt - crom și pe bază de nichel - crom. Au fost utilizate două coroane dentare (CoCrW în stare lustruită și NiCr finisată preliminar) pentru încadrarea în limitele dimensionale ale probelor pentru microscop și s-a dorit

obținerea unor imagini SEM și analiza elementală prin spectroscopie dispersivă cu raze X ale acestora în zone diferite. În total, pentru regiunea selectată au fost alese în total câte șase zone de interes pentru ambele coroane dentare, dorindu-se evaluarea compozițională chimică pentru toate cele șase zone. Unele rezultatele obținute în urma acestei cercetări se prezintă în fig. 36-39.

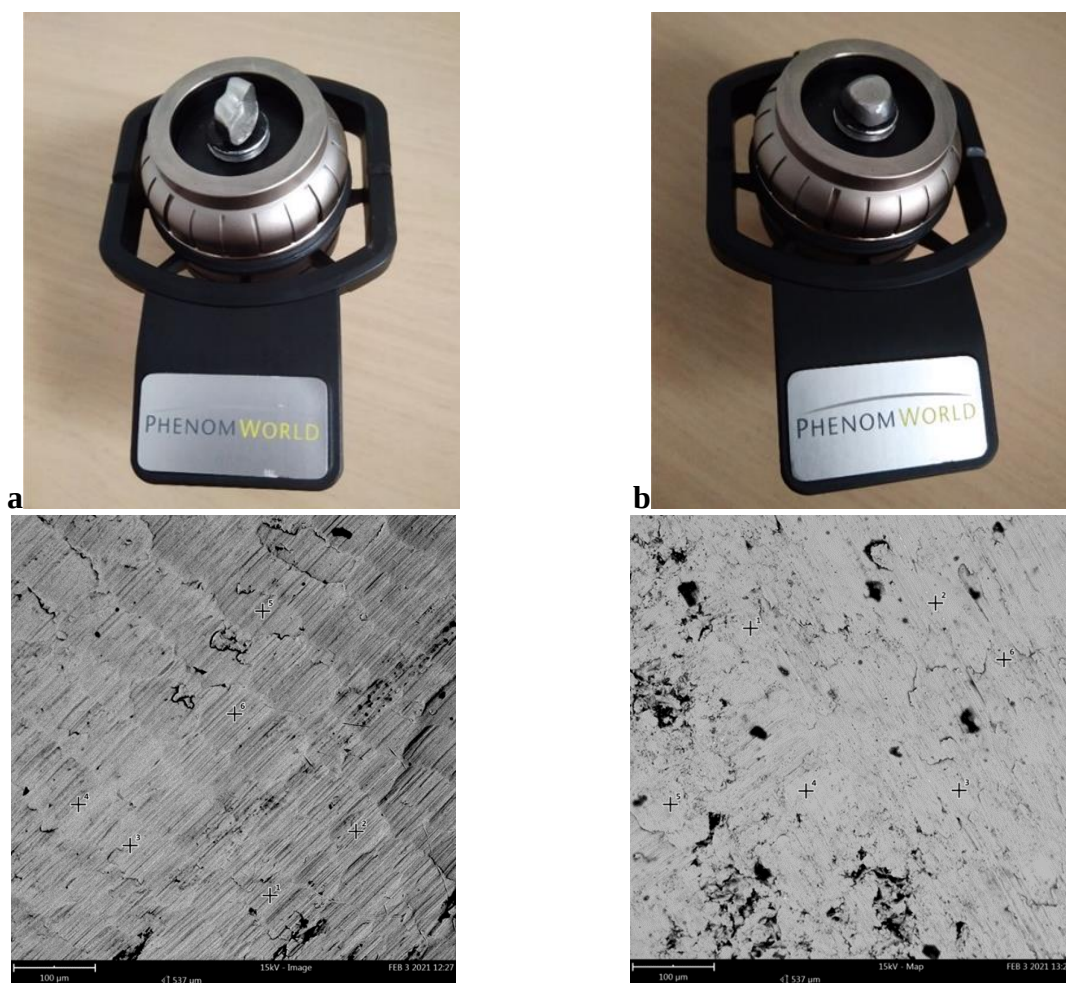


Fig. 36. Unele rezultate privind analiza elementală prin spectroscopie dispersivă cu raze X a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser: imagini SEM ale protezelor dentare din CoCr (a) și NiCr (b) cu zonele de interes marcate pentru analiza elementală prin spectroscopie EDS, mărire 500x

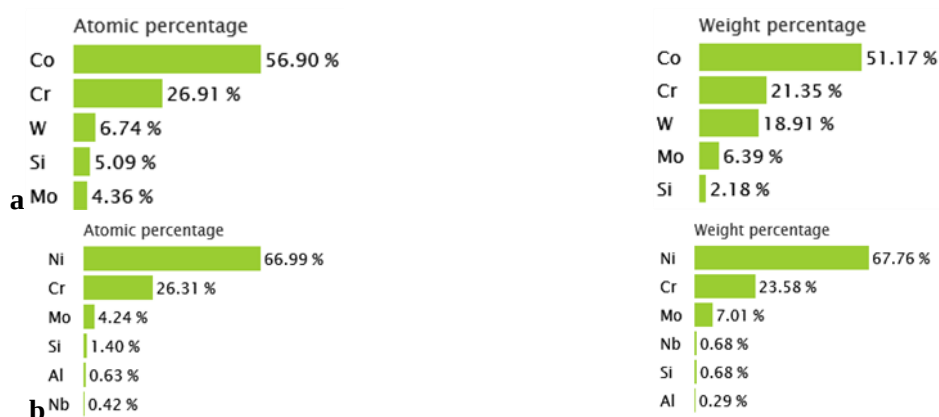


Fig. 37. Unele rezultate obținute privind concentrația procentuală atomică și masică pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser: CoCr (a) și NiCr (b)

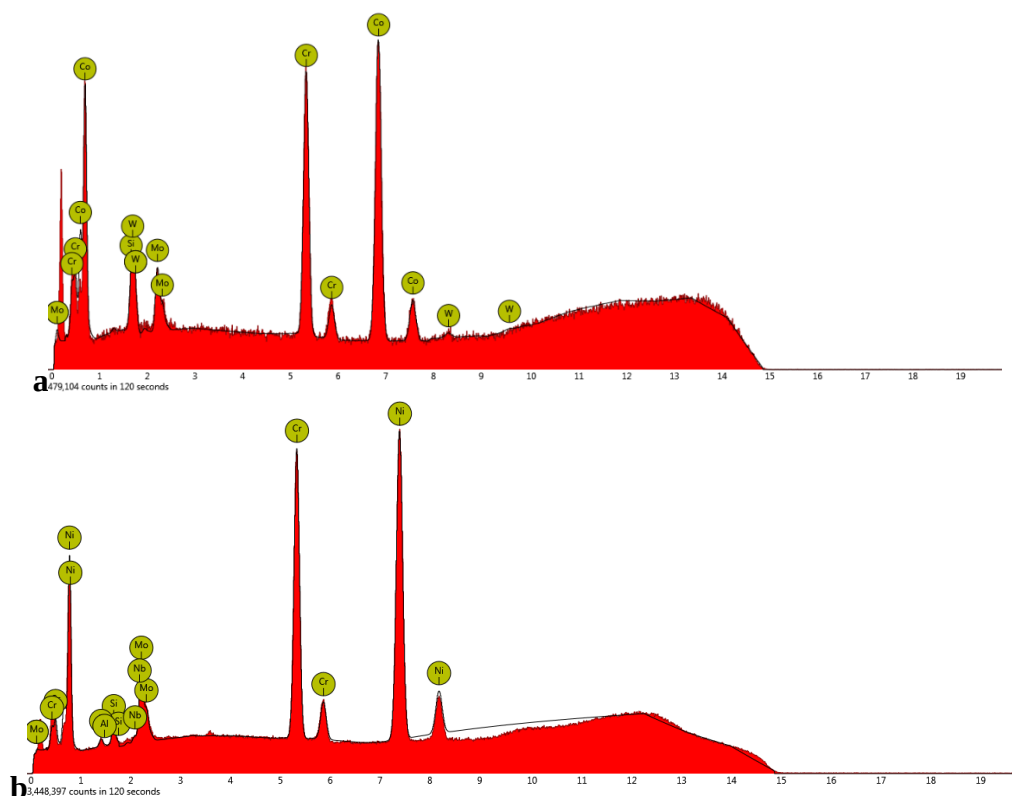


Fig. 38. Unele rezultate privind imaginile spectroscopice EDS obținute pentru zone de interes: CoCr (a) și NiCr (b)

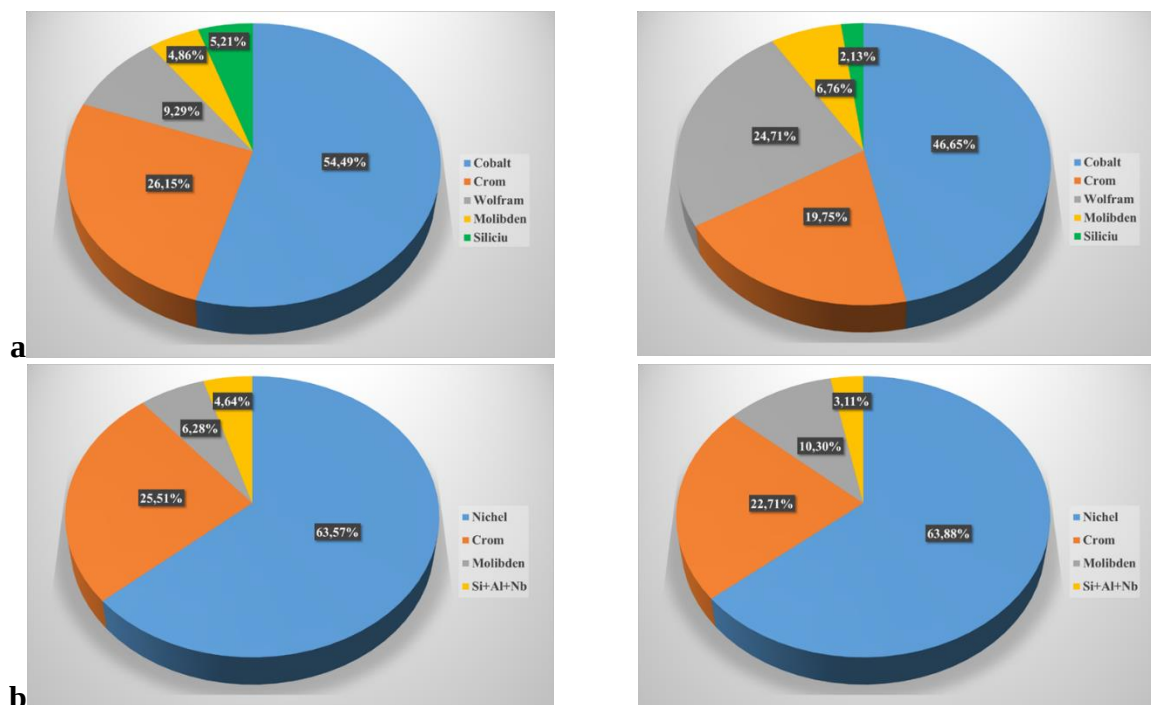


Fig. 39. Concentrația procentuală masică și atomică medie determinată pentru proteza dentară din CoCr (a) și NiCr (b)

În subcapitolul 7.5 am prezentat rezultatele cercetărilor experimentale privind determinarea durității protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser. Proteza dentară realizată prin topire selectivă cu laser a fost polisată pe cale mecanică pentru a putea fi supusă încercării la duritate. În total au fost alese cinci suprafețe diferite și s-a realizat comparația valorii durității rezultate în urma determinării experimentale cu valorile durității acestui material realizat prin tehnologii tradiționale.

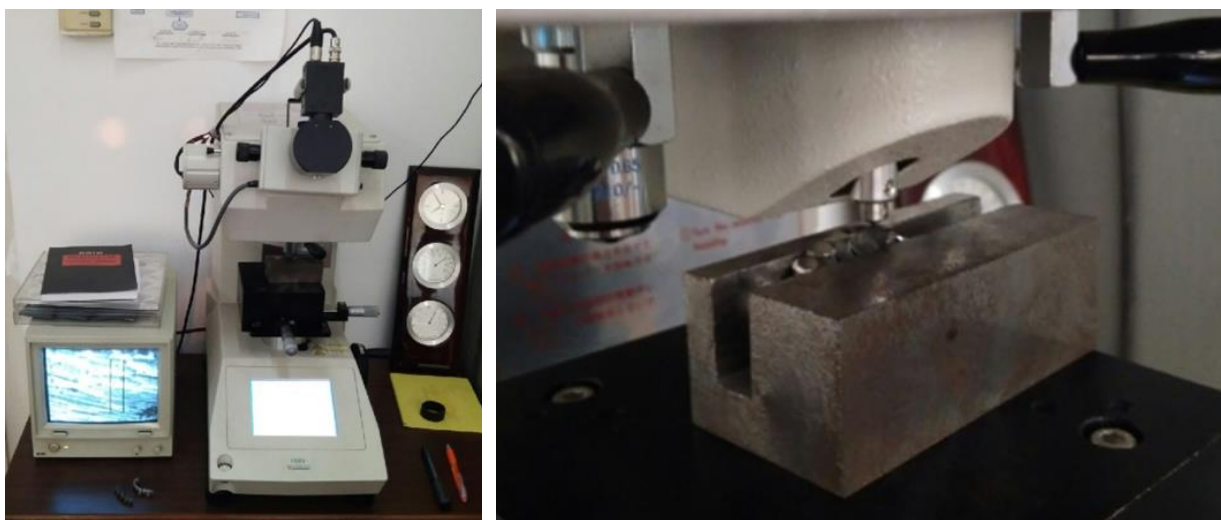


Fig. 40. Încercarea la duritate a protezei dentare realizate prin topire selectivă cu laser

În fig. 41 prezintă unele rezultate ale cercetărilor experimentale privind duritatea protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser.

După această cercetare experimentală se poate concluziona că protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser după polisare posedă o duritate conformă, mai mare considerabil decât materialul de înlocuit (duritatea smalțului 275 HV). Mai mult decât atât, toate cele cinci valori ale durității determinate depășesc valorile durității pentru aliaje cu compoziție asemănătoare, dar realizate prin metode clasice (sub 450 HV) și valorile durității din fișa tehnică a pulberii metalice din care a fost realizată proteza dentară (485-490 HV). De asemenea, valorile determinate pentru duritate sunt apropiate de cele obținute de alți cercetători pentru aliaje realizate prin topire selectivă cu laser cu compoziție chimică asemănătoare [205] [206] și este demonstrat faptul că cu ajutorul topirii selective cu laser se obțin structuri cu o duritate superioară față de structurile realizate din același material, dar prin tehnologii convenționale de turnare sau frezare. Acest lucru constituie un avantaj major pentru performanța în timp a protezelor dentare, iar cu compensarea altor deficiențe existente la această oră, protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser cu siguranță vor reprezenta prima alegere pentru specialiștii stomatologi, pacienți, tehnicieni dentari sau cercetători [130].

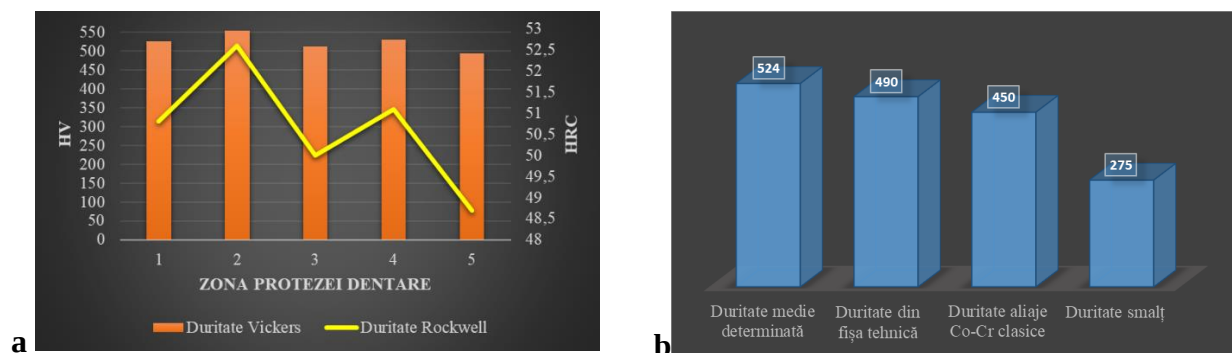


Fig. 41. Rezultate ale cercetărilor experimentale privind determinarea durității protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser: a - valorile durității determinate exprimate în unități HV și HRC pentru proteza dentară realizată prin topire selectivă cu laser; b - comparația valorilor durității exprimate în unități Vickers pentru duritatea medie a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser, duritatea din fișa tehnică, duritatea unor aliaje clasice pe bază de Co-Cr și duritatea smalțului

CONCLUZII

C1 Concluzii generale

Tehnologiile aditive prezintă un interes din ce în ce mai pronunțat în tot mai multe domenii, mai ales în domeniul proteticii dentare datorită avantajelor deosebite, iar cercetările din cadrul acestei teze de doctorat au evidențiat acest aspect. Cu toate acestea, există și unele dezavantaje, dar cu siguranță aceste tehnologii vor avea o direcție continuă de dezvoltare și perfecționare și pot deveni în curând prima opțiune în rândul medicilor stomatologi, tehnicienilor dentari și pacienți în ceea ce privește tehnologia de obținere a protezelor dentare.

În urma unor documentări ample în ceea ce privește problemele ce țin de anatomia și protetica dentară, tehnologiile de obținere a protezelor dentare, proprietățile materialelor biocompatibile utilizate în protetica dentară și tehnologiile aditive cu aplicații în protetica dentară, am realizat mai multe proteze și modele protetice dentare din materiale diferite utilizând diverse tehnologii aditive/subtractive computerizate, echipamente și parametri de proces diferiți. Protezele dentare și modelele protetice dentare realizate prin tehnologii aditive din diferite materiale au fost caracterizate și analizate din mai multe puncte de vedere utilizând echipamente, programe și sisteme de analiză moderne și performante, evidențiind avantajele, dezavantajele, prelucrând și comparând rezultatele obținute, fiind propuse și unele soluții de optimizare. Cercetările experimentale au demonstrat avantajul protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser privind unele caracteristici mecanice în comparație cu protezele dentare realizate prin tehnologii clasice. În același timp, cercetările experimentale au arătat și evidențiat cât de importantă este post-procesarea corespunzătoare a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser pentru a obține performanțele optime și dorite. De asemenea, am realizat modelări numerice privind analiza prin metoda elementelor finite a structurilor dentare obținute prin scanare intraorală digitală utilizând mai multe instrumente software de simulare performante și modelarea matematică a procesului de topire selectivă cu laser, în urma căreia s-au putut determina caracteristicile termice din timpul procesului de topire selectivă cu laser pentru mai multe biometale utilizate în protetica dentară și a fost stabilită influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor termice a biometalelor procesate.

Unele dintre rezultatele obținute în urma cercetărilor au fost comparate cu rezultatele analitice sau numerice din simulare sau cu rezultatele obținute de alți cercetători. De asemenea, o parte din rezultatele obținute în prezenta teză de doctorat au fost publicate în reviste de specialitate sau susținute la conferințe internaționale. În total am realizat **40** de lucrări științifice ca prim autor sau coautor (dintre care **12** au fost deja indexate ISI) și o carte, specifice temei de doctorat, care se regăsesc în bibliografie, dar și din domenii conexe tezei de doctorat sau alte domenii ale mecanicii și mecatronicii, iar unele din lucrările publicate au fost deja citate de mai mulți cercetători în publicații internaționale de prestigiu.

C2 Contribuții originale

În concordanță cu obiectivele stabilite pentru prezenta teză de doctorat, printre contribuțiile proprii și originale importante doresc să menționez:

- ✓ Realizarea unor cercetări ample privind problemele privind natura anatomiei și proteticii dentare, tehnologiile moderne și actuale de realizare a protezelor dentare (cap. 1 și cap. 2);
- ✓ Realizarea unei cercetări privind biomaterialele utilizate în protetica dentară și proprietățile acestora, dar și tehnologiile aditive cu aplicații în protetica dentară și metodele tehnologice de post-procesare ale acestora propunând și alte posibile aplicații ale tehnologiilor aditive în medicină și alte domenii (cap. 3 și cap. 4);
- ✓ Propunerea și elaborarea unei metode originale de analiză comparativă a

biomaterialelor protetice dentare în funcție de principalele caracteristici și factorii esențiali, cu ajutorul căreia se poate alege mai ușor materialul corespunzător pentru fiecare pacient individual (cap. 3.4);

- ✓ Obținerea protezelor și modelelor protetice dentare prin intermediul mai multor tehnologii aditive și substructive moderne computerizate: depuneri selective cu laser, extrudare termoplastică, fotopolimerizare în cuvă și frezare CAD-CAM. Au fost utilizate diferite echipamente, materii prime, sisteme software și parametri de proces pentru realizare, iar structurile obținute, materialele și echipamentele au fost caracterizate și comparate, fiind identificate soluții de analiză și optimizare (cap. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6);
- ✓ Simularea numerică prin metoda elementelor finite a structurilor dentare obținute prin intermediul scanării intraorale digitale personalizate. Au fost utilizate mai multe instrumente software avansate de simulare și procesare a fișierelor digitale obținute prin scanare intraorală, inclusiv am exemplificat posibilitatea utilizării unor instrumente avansate combinate de proiectare CAD anatomică și programe de analiză CAE inginerești (cap.5.7 și 5.8);
- ✓ Modelarea matematică a procesului de topire selectivă cu laser privind transferul de căldură, în urma căreia au fost obținute unele caracteristici termice din timpul procesului de topire selectivă cu laser pentru trei biometale utilizate la realizarea protezelor dentare. A fost determinată influența unor parametri de proces importanți ca grosimea stratului de pulberi, viteza și puterea laserului asupra caracteristicilor termice din timpul procesului de topire selective cu laser ale unor biometale utilizate la realizarea protezelor dentare și au fost evidențiate materialele cu cele mai bune proprietăți în urma modelării matematice (cap. 6.1 și cap. 6.2);
- ✓ Realizarea unui studiu experimental privind testarea la unele solicitări mecanice a modelelor protetice dentare realizate prin tehnologii aditive, materiale și echipamente diferite. Datele experimentale au fost prelucrate, evidențiind materialele cele mai potrivite din punct de vedere al performanțelor impuse. Unele date experimentale determinate au fost comparate cu rezultatele obținute în urma simulării prin metoda analizei cu elemente finite (cap. 7.1);
- ✓ Determinarea pe cale experimentală a celor mai potrivite materiale pentru realizarea modelelor protetice dentare în ceea ce privește rezistența la uzură (cap. 7.2);
- ✓ Efectuarea unor cercetări experimentale privind precizia dimensională a tehnologiilor aditive și a echipamentelor utilizate la realizarea modelelor protetice dentare, identificând cauzele posibile de apariție a erorilor dimensionale (cap. 7.3.1);
- ✓ Analiza termografică a modelelor dentare realizate prin tehnologii aditive și evidențierea modului răcirii structurii după finalizarea construcției (cap. 7.3.2);
- ✓ Determinarea experimentală a grosimii straturilor depuse pentru materialele utilizate la realizarea modelelor protetice dentare utilizând un sistem de măsurare multisenzorial performant. Datele experimentale obținute au fost prelucrate și comparate cu valoarea nominală a grosimii straturilor setate din program, stabilind materialul și echipamentul optim din acest punct de vedere (cap. 7.3.3);
- ✓ Stabilirea pe cale experimentală a nanorugozității și microtopografiei suprafețelor protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser aflate în stadii diferite de post-procesare cu ajutorul microscopiei de forță atomică. A fost evidențiat modul în care operațiile de post-procesare influențează rugozitatea suprafețelor la microscară, stabilind parametri ca abaterea medie aritmetică, abaterea medie pătratică, distanța dintre extremitățile neregularităților și comparând rezultatele obținute (cap. 7.3.4);
- ✓ Analiza microscopică a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser aflate în diferite stadii de post-procesare (cap. 7.3.5);
- ✓ Determinarea experimentală a compoziției chimice ale aliajelor utilizate pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser utilizând analiza elementală

prin spectroscopie dispersivă cu radiații X. Au fost obținute imagini SEM și imagini spectroscopice EDS pentru suprafețele protezelor dentare, determinându-se concentrația procentuală masică și atomică pentru două aliaje diferite utilizate pentru realizarea protezelor dentare prin intermediul topirii selective cu laser (cap. 7.4);

- ✓ Determinarea experimentală a durității protezelor dentare executate prin topire selectivă cu laser după operația de polisare. Rezultatele obținute au fost comparate cu valorile durității specificate în fișa tehnică a aliajului și cu valorile durității pentru structurile realizate prin metode clasice din aliaje cu compoziție chimică asemănătoare, dar și cu rezultatele determinărilor durității realizate de alți cercetători pentru structurile realizate prin topire selectivă cu laser din aliaje cu compoziție chimică similară (cap. 7.5)

C3 Perspective privind dezvoltarea cercetărilor pentru tehnologiile de execuție a protezelor dentare în viitor

Analizând rezultatele obținute în cadrul cercetărilor efectuate din prezenta teză de doctorat, au fost conturate câteva direcții și perspective posibile privind dezvoltarea cercetărilor ulterioare pentru tehnologiile de execuție a protezelor dentare, printre care se pot evidenția următoarele:

- Continuarea cercetărilor privind alte materiale ce pot fi utilizate ca materie primă pentru execuția protezelor și modelelor protetice dentare prin tehnologii aditive, inclusiv a materialelor ceramice;
- Efectuarea unor cercetări suplimentare privind condițiile optime de imprimare și post-procesare pentru aplicațiile proteticii dentare cu scopul de a obține restaurări și modele protetice dentare cu proprietăți îmbunătățite;
- Realizarea modelelor protetice dentare prin intermediul altor tehnologii aditive ca pulverizarea de liant sau pulverizarea de material, cât și evaluarea caracteristicilor fizice și mecanice ale acestora;
- Efectuarea unor cercetări privind realizarea protezelor dentare prin alte tehnologii aditive metalice – topirea cu fascicul de electroni și depunerea cu energie directă;
- Extinderea cercetărilor privind proprietățile și caracteristicile protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser și prin alte tehnologii aditive comparativ cu protezele dentare realizate prin metode de fabricație convenționale;
- Realizarea unor cercetări privind unele încercări mecanice pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser și prin alte tehnologii aditive;
- Efectuarea unor teste specifice de biocompatibilitate și citotoxicitate pentru protezele dentare realizate prin topire selectivă cu laser și tehnologii clasice din diverse materiale;
- Studiul acțiunii unor fluide și biofluide asupra performanțelor protezelor dentare realizate prin tehnologii aditive;
- Aprofundarea simulărilor prin metoda elementelor finite pentru structuri complexe protetice dentare utilizând sisteme software de analiză avansate;
- Realizarea unor cercetări suplimentare privind modelarea matematică și simularea numerică pentru unele tehnologii de fabricație aditivă utilizând medii software de analiză specifice;
- Dezvoltarea unor cercetări experimentale privind finisarea prin polisare electrochimică a protezelor dentare realizate prin topire selectivă cu laser și studiul caracteristicilor protezelor dentare electropolisate în comparație cu protezele dentare finisate prin metode mecanice clasice.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ **(extras dintr-un total de 206 referințe)**

- [4] Berkowitz B., Holland G., Moxham B., Oral Anatomy, Histology and Embriology, Edited by Mosby, 2009;
- [6] Anselm Wiskott H.W., Fixed Prosthodontics. Principles and clinics. Quintessence Publ., 2011;
- [10] Fernandes N.A., Vally Z.I., Sykes L.M., The longevity of restorations - a literature review, SADJ, vol.70, no.9, pp.410-413, 2015;
- [11] Carlsson G.E., Success and Failure of Different Types of Crowns and Fixed Dental Prostheses, JPPA, vol.2(1), pp.24-32, 2014;
- [15] Shillingburg H.T. et al, Fundamentals of fixed prosthodontics, Fourth edition, Quintessence Publishing Co, Inc;
- [31] **E.Moraru**, O.Donțu, A.Petre, D.Vaireanu, F.Constantinescu, D.Besnea, Some technological particularities on the execution of dental prostheses realized by selective laser deposition, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol.20, no.3-4, pp.208-213, 2018;
- [51] T. Miyazaki, Y.Hotta, CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. Aust Dent J, vol.56, pp.97-106, 2011;
- [55] U. ben Irfan, K.Aslam, R.Nadim, A Review On Cad Cam In Dentistry, J Pak Dent Assoc, vol.24(3): 112116;
- [56] J.P.Kruth, X.Wang, T.Laoui, L.Froyen, Lasers and materials in selective laser sintering, Assembly Automation, vol. 23(4), pp. 357-371, 2003;
- [57] Dontu O., Tehnologii de prelucrat cu laser, Ed. Tehnică, 1985, Bucuresti;
- [58] A.Tathe, M.Ghodke, A.P.Nikalje, A brief review: Biomaterials and their applications, International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, vol.2, pp.19-23, 2010;
- [59] N.R.Patel, P.P.Gohil, A Review on Biomaterials: Scope, Applications & Human Anatomy Significance, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol.4(2), pp.91-101, 2012;
- [61] V.Saenz de Viteri, E.Fuentes, Titanium and Titanium Alloys as Biomaterials, In: Jrgen Gegner (Eds.), Tribology - Fundamentals and Advancements, 2013;
- [66] M.J. Tyas, Dental materials science – the maintenance of standards, J Oral Rehabil., vol.18, no.2, pp.105-110, 1991;
- [70] K.J.Chun, H.H.Choi, J.Y.Lee, Comparison of mechanical property and role between enamel and dentin in the human teeth, J Dent Biomech, vol.5, 2014;
- [82] D.Besnea, O.Dontu, **E.Moraru**, E.Dinu, Tehnologii aditive cu aplicații în mecatronică. Construcție și exploatare, Editura Printech, 2019, București.
- [89] S.Negi, R.K.Sharma, Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review, Journal of Manufacturing Technology Research, vol.5, pp.75-96, 2013.
- [90] D.Besnea, O.Dontu, V.Constantin, A.Spanu, C.Rizescu, **E.Moraru**, Applications of additive technologies in the food industry, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, vol.3, pp.245-248, 2018;
- [93] D.Besnea, **E.Moraru**, O. Dontu, V.Constantin, A.Spanu, R.Ciobanu, Research on the realization of anatomical models by additive technologies, International Journal of Modeling and Optimisation, vol.8, no.4, pp.208-211, 2018;
- [96] N.N.Kumbhar, A.V.Mulay, Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review, J. Inst. Eng. India Ser. C vol. 99(4) pp.481–487, 2018;
- [97] **E.Moraru**, D.Besnea, O.Dontu, G.I. Gheorghe, V.Constantin, Applications of Additive Technologies in Realization of Customized Dental Prostheses, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, vol.3, pp.66-71, 2018;

- [98] **E.Moraru**, O.Dontu, D.Besnea, V.Constantin, Study and realization of prosthetic dental models by additive technologies, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 444 042017, 2018;
- [100] P.Berce, N.Balc, C.Caizar, R.Pacurar, A.Radu, S.Branean, I. Fodorean, Tehnologii de fabricatie prin adaugare de material si aplicatiile lor (Bucuresti: Editura Academiei Romane), 2014;
- [102] J-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen and M. Rombouts, Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, vol.11, no.1, pp.26-36, 2005;
- [110] Dontu O., Tehnologii și sisteme integrate de fabricație pentru mecatronică, Editura Printech, 2009, Bucuresti;
- [115] **E.Moraru**, O.Dontu, D.Besnea, C.Rizescu, D.Rizescu, V.Constantin, Theoretical and numerical researches on the electrochemical polishing of dental prostheses realized by selective laser melting, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 564 012029, 2019;
- [122] D.Besnea, O.Dontu, **E.Moraru**, C.Rizescu, G.I.Gheorghe, E.Dinu (2020) Constructive Solution for Multi-filament 3D Printing. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 85. Springer, Cham;
- [125] **E.Moraru**, D.Besnea, A.Spanu, V.Constantin, Experimental research on some modern technologies and materials applied in prosthetic dentistry, Journal of Engineering Sciences and Innovation, vol.3, Iss.4, pp.329-338, 2018;
- [130] **E.Moraru**, O.Dontu, C.Rizescu, A.Spanu, R.Ciobanu, C.Draghici, Laser-assisted additive technologies for the execution of dental restorative prostheses, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012050, 2020;
- [139] **E.Moraru**, O.Dontu, A.Spanu, D.Prisecaru, C.Draghici, Some considerations regarding the use of vat photopolymerisation technique in prosthodontics, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Iss.6, Vol.I, pp.87-90, 2019;
- [141] A.N.Natali, Dental biomechanics, Editura Taylor&Francis, New York, 2003;
- [143] L.B.Durand, J.C.Guimaraes, S.Monteiro Junior, L.N.Baratieri, Modeling and validation of a 3D premolar for finite element analysis, Rev Odontol UNESP, vol.45, no.1, pp.21-26, 2016;
- [151] Materialise Mimics software, <https://www.materialise.com/en/medical/mimics-innovation-suite/mimics>;
- [152] Ansys software, <https://www.ansys.com/>;
- [153] D. Rosenthal, The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments, Transactions of the ASME, 68, pp. 849-866, 1946;
- [155] P.Bajaj, SLM Manufacturing of Molybdenum, Disertation, University of Sheffield, 2016;
- [158] L.Shpakova, G.I.Gheorghe, C.Nitu, O.Dontu O, **E.Moraru**, D.Besnea, D.Dragomir (2020) Thermal Analysis of Some Prosthetic Dental Biomaterials Processed by Selective Laser Melting. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 85. Springer, Cham
- [159] C. A. Boley, S. C. Mitchell, S. Rubenchik, S. S. Q. Wu, Metal powder absorptivity: modeling and experiment, Applied Optics, vol.55, no.23, 2016;
- [162] P.A.Hooper, Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion, Additive manufacturing, vol.22, pp.548-559, 2018;
- [165] Test Stand HV-500N Imada, <https://www.hans-schmidt.com/>;
- [166] **E.Moraru**, O.Dontu, D.Besnea, C.Rizescu, D.Rizescu, A.Popescu-Cuta, Experimental researches regarding mechanical behaviour of dental prototypes realized by additive technologies, MATEC Web of Conferences, vol. 290, Pages 03011, 2019;
- [167] **E.Moraru**, O.Dontu, C.Rizescu, D.Rizescu, Comparative study and mechanical analysis of some additive manufactured dental models, 8th International Conference on

- Materials Science and Technologies – RoMat 2020, Bucharest, Romania, November 26-27th, 2020;
- [171] D. Besnea, C.Rizescu, **E.Moraru**, E.Dinu, I.Panait, Comparative study regarding the wear of gearwheels manufactured through additive technologies, MATEC Web of Conferences, vol.290, Pages 08001, 2019;
 - [173] E.George, P.Liacouras, F.J.Rybicki, D.Mitsouras, Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models, Radiographics, vol.37(5), p. 1424–1450, 2017;
 - [175] **E.Moraru**, M.F.Stefanescu, O.Dontu, C.Rizescu, C.Draghici, Thermographic Analysis of 3D Printed Dental Models. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber- MixMechatronics - 2020. ICOMECYME 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 143. Springer, Cham;
 - [181] E.R.Baciu, N.C.Forna, Influența tehnicilor de finisare asupra rugozității suprafețelor componentelor metalice ale restaurărilor protetice, Rev. Med. Chir. Soc. Med. Nat., vol.114, nr.4, 2010, Iași, pp.1198-1203;
 - [182] V.L. Mironov, Fundamentals of Scanning Probe Microscopy, The Russian Academy of Science, Nizhniy Novgorod, 2004;
 - [188] O.I.Vaulina, Metode de cercetare macroscopică pentru metale și aliaje (în rusă), Universitatea Politehnica din Tomsk, Institutul de fizica tehnologiilor avansate, 2015;
 - [195] D.Shindo, T.Oikawa, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, In: Analytical Electron Microscopy for Materials Science. Springer, Tokyo, 2002;
 - [201] J.Goldstein, D.Newbury, D.Joy, C.Lyman, P.Echlin, E.Lifshin, L.Sawyer, J.Michael, Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, Third Edition, Springer, New York, 2003;
 - [205] N.A.Dolgov, T.Dikova, D.Dzhendov, D.Pavlova, M.Simov, Mechanical properties of dental Co-Cr alloys fabricated via casting and selective laser melting, Scientific Proceedings II International Scientific-Technical Conference "Innovations in Engineering", pp.29-33, 2016;
 - [206] Y.Lu, S.Wu, Y.Gal, J.Li, C.Zhao, D.Zhuo, J.Lin, Investigation on the microstructure, mechanical property and corrosion behavior of the selective laser melted CoCrW alloy for dental application, Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, vol.49, pp.517-525, 2015;

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

Cercetările efectuate pe parcursul studiilor de doctorat au fost diseminate prin publicarea mai multor articole în reviste de specialitate indexate ISI, BDI și alte baze de date internaționale și participarea la multiple conferințe internaționale din domeniu. Pe lângă lucrările științifice publicate asociate cu tema studiilor doctorale, care se regăsesc și în bibliografia tezei de doctorat, am realizat și alte lucrări din domenii conexe tezei de doctorat sau alte domenii ale mecanicii și mecatronicii. Mai jos se regăsesc toate publicațiile științifice realizate ca prim autor sau coautor din timpul studiilor doctorale.

Lucrări științifice indexate ISI

1. **E. Moraru**, O. Dontu, A. Petre, D. Vaireanu, F. Constantinescu, D. Besnea, Some technological particularities on the execution of dental prostheses realized by selective laser deposition, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol.20, No 3-4, March-April 2018, pp.208-213;
2. **E. Moraru**, O. Dontu, D. Besnea, V. Constantin, Study and realization of prosthetic dental models by additive technologies, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 444 042017, 2018;
3. D. Besnea, C.I. Rizescu, D. Rizescu, D. Comeaga, R. Ciobanu, **E. Moraru** - Study of deflection behaviour of 3D printed leaf springs, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 444 042008, 2018;
4. **E. Moraru**, O. Dontu, D. Besnea, C. Rizescu, D. Rizescu, V. Constantin, Theoretical and numerical researches on the electrochemical polishing of dental prostheses realized by selective laser melting, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 564 012029, 2019;
5. **E. Moraru**, O. Dontu, D. Besnea, C. Rizescu, D. Rizescu, A. Popescu-Cuta, Experimental Researches Regarding Mechanical Behaviour of Dental Prototypes realized by Additive Technologies, MATEC Web of Conferences, Volume 290, Pages 03011, 2019;
6. N. Baran, M. Constantin, B. Tănase, **E. Moraru**, C. I. Moga, Influence of fine bubble generator architecture on time variation of dissolved oxygen concentration in water, Revista de Chimie, 70(6), pp. 2132-2135, 2019;
7. D. Besnea, E. Dinu, **E. Moraru**, A. Spanu, C. Rizescu, V. Constantin, Experimental researches regarding the manufacturing of new thermoplastic materials used in additive technologies, Materiale Plastice, 56(1), pp. 167-170, 2019;
8. Rizescu C.I., Besnea D., Rizescu D., **Moraru E.**, Constantin V. (2019) Mechanical Analysis of Leaf Springs Realized by Additive Technologies. In: Trojanowska J., Ciszak O., Machado J., Pavlenko I. (eds) Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham;
9. D. Prisecaru, D. Besnea, **E. Moraru**, S. Cananau, Additive Manufactured Bioplastics for Conceptual Models of Knee Customized Prostheses, Revista Materiale Plastice, Vol.56, No.4, pp.957-963, 2019;
10. M. Selagea, **E. Moraru**, D. Besnea, R. Udrea, B. Lungu, Some technological aspects regarding laser ablation of oxides resulting from exposing alloyed steels to high temperatures, Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, Vol.13, No.9-10, pp.539-545, 2019;
11. D. Besnea, C. Rizescu, **E. Moraru**, I. Panait, D. Rizescu, I. Dinu, Using of additive technologies in fabrication of casting models, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 564 012016, 2019;
12. D. Besnea, C. Rizescu, **E. Moraru**, E. Dinu, I. Panait, Comparative study regarding the wear of gearwheels manufactured through additive technologies, MATEC Web of Conferences, Volume 290, Pages 08001, 2019.

1. **Moraru E.**, Besnea D., Dontu O., Gheorghe G.I., Constantin V. (2019) Applications of Additive Technologies in Realization of Customized Dental Prostheses. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2018. ICOMECYME 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 48. Springer, Cham;
2. Besnea D., Dontu O., Constantin V., Spanu A., Rizescu C., **Moraru E.** (2019) Applications of Additive Technologies in the Food Industry. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2018. ICOMECYME 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 48. Springer, Cham;
3. Dontu O., Ioana M.C., Tănase B., Băran N., Gheorghe G.I., **Moraru E.** (2019) Researches Regarding the Use of Additive Technologies in the Construction of Water Aeration Elements. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2018. ICOMECYME 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 48. Springer, Cham;
4. Besnea D., Rizescu D., Rizescu C., Dinu E., Constantin V., **Moraru E.** (2019) Additive Technologies and Materials for Realization of Elastic Elements. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2018. ICOMECYME 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 48. Springer, Cham;
5. D. Rizescu, D. Besnea, C. I. Rizescu, **E. Moraru**. Study behavior of Geneva mechanism using 3D printing technology, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 514 012032, 2018;
6. **E. Moraru**, M. Selagea. Design, modeling and simulation of thermal microactuators. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol.80, Iss.3, pp.19-30, 2018;
7. D. Besnea, G. I. Gheorghe, O. Dontu, **E. Moraru**, V. Constantin, I. C. Moga, Experimental researches regarding realization of wastewater treatment elements by means of modern technologies, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Issue 4, pp.61-65, 2018;
8. I.C. Moga, O.G. Donțu, N. Băran, D. Besnea, **E. Moraru**, G. Petrescu, Aeration system to be used in wastewater treatment, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 572 012105, 2019;
9. Besnea D., Dontu O., **Moraru E.**, Rizescu C., Gheorghe G.I., Dinu E. (2020) Constructive Solution for Multi-filament 3D Printing. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 85. Springer, Cham;
10. Shpakova L., Gheorghe G.I., Nitu C., Dontu O., **Moraru E.**, Besnea D., Dragomir D. (2020) Thermal Analysis of Some Prosthetic Dental Biomaterials Processed by Selective Laser Melting. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 85. Springer, Cham;
11. **Moraru E.**, Besnea D., Dontu O., Gheorghe G.I., Moga I.C., Popescu G.E. (2020) Fabrication Technologies of Aeration Systems for the Ecological Treatment of Wastewater. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics – 2019. ICOMECYME 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 85. Springer, Cham;
12. **E. Moraru**, O. Dontu, A. Spanu, D. Prisecaru, C. Draghici, Some considerations regarding the use of vat photopolymerisation technique in prosthodontics, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Iss.6, Vol.I, pp.87-90, 2019;
13. A. Spanu, D. Besnea, **E. Moraru**, The suspension system with pressure control used for lower limb prostheses, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Iss.6, Vol.II, pp.15-18, 2019;
14. M. Dascalu, D. Dragomir, D. Besnea, L. Dobrescu, A.M. Pascalau, D. Dobrescu, E. Franti, **E. Moraru**, A. Plavitu, Mechatronic structure for forearm prosthesis with artificial skin, Smart Innovation, Systems and Technologies 174, pp. 471-481, 2020;

15. Dinu E., Besnea D., Ping A.S., Spanu A., **Moraru E.**, Panait I. (2020) Device for Injection Molding Realized by Additive Technologies. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber- MixMechatronics – 2020, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 143. Springer, Cham;
16. Spânu A.R., Besnea D., **Moraru E.** (2020) The Dynamic Modeling of Ball and Plate Mechatronic System with Two Simultaneously Degrees of Freedom. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber- MixMechatronics – 2020, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 143. Springer, Cham;
17. **E. Moraru**, M.F. Stefanescu, O. Dontu, C. Rizescu, C. Draghici, Thermographic Analysis of 3D Printed Dental Models. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber- MixMechatronics - 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 143. Springer, Cham;
18. **E. Moraru**, O. Dontu, C. Rizescu, A. Spanu, R. Ciobanu, C. Draghici, Laser-assisted additive technologies for the execution of dental restorative prostheses, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012050, 2020;
19. D. Besnea, M. Avram, S. Cananau, **E. Moraru**, A. Spanu, V. Constantin, I. C. Panait, Constructive and functional particularities of 3D printers with applications in the food industry, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012036, 2020;
20. D. Besnea, E. Dinu, C. Rizescu, **E. Moraru**, D. Rizescu, N. Baran, T. Pascu, I.C. Panait, Experimental stand for studying the stretch behaviour of woven plastic nets used in the food industry, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012037, 2020;
21. **E. Moraru**, O. Dontu, N. Baran, A. Petre, C.I. Moga, Experimental researches regarding the depollution of wastewater by forced oxygenation and ozonation, Revista de Chimie, Nr.9 (1), pp.202-209, 2020;
22. G. Ionașcu, E. Manea, R. Gavrilă, **E. Moraru**, Perspectives on the use of thin films technologies in precision mechanics and mechatronics, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Issue 8, Vol. II, pp.204-208, 2020;
23. **E. Moraru**, O. Dontu, C. Rizescu, D. Rizescu, Comparative study and mechanical analysis of some additive manufactured dental models, 8th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2020, Bucharest, Romania, November 26-27th, 2020, lucrare susținută la conferință (în curs de publicare).

Alte publicații

1. D. Besnea, **E. Moraru**, O. Dontu, V. Constantin, A.Spanu, R.Ciobanu - Research on the realization of anatomical models by additive technologies, International Journal of Modeling and Optimisation, Vol.8, No.4, pp.208-211, 2018;
2. **E. Moraru**, D. Besnea, A. Spanu, V. Constantin, Experimental research on some modern technologies and materials applied in prosthetic dentistry, Journal of Engineering Sciences and Innovation, Vol.3, Iss.4, pp.329-338, 2018;
3. D. Besnea, O. Donțu, **E. Moraru**, E.Dinu, Tehnologii aditive cu aplicații în mecatronică. Construcție și exploatare (carte), Editura PRINTECH, București, 2019;
4. C.I. Moga, **E. Moraru**, O. Dontu, D. Besnea, B.I. Doroftei, A. Isitman, G. Petrescu, Innovative technological solutions for efficient biological wastewater treatment, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Vol.18 (4), pp.181-186, 2020;
5. Stoican (Prisecaru) M.M, Băran N., Besnea D., **Moraru E.**, A constructive solution for a rotating machine with profiled rotors that transport fluids, Fiability & Durability / Fiabilitate si Durabilitate, Issue 1, p.194-203, 2020;
6. Gheorghe V., **Moraru E.**, Shpakova L., Kinematic chain elements effect on the design of robot manipulators drive control systems, Proceedings of the International scientific and practical online conference “Integration of Science, education and production as the basis for implementation of the Nation Plan” (Saginov’s readings No. 12), June 18-19, 2020, Karaganda State Technical University.