



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII DE MAȘINI

ȘI MANAGEMENT INDUSTRIAL



DEPARTAMENTUL DE TEHNOLOGIA CONSTRUCȚIILOR DE MAȘINI

**CONTRIBUȚII PRIVIND TEXTURAREA LASER A
PIESELOR DIN MATERIALE BIODEGRADABILE
OBTINUTE PRIN INJECTARE**

REZUMAT

Conducători de doctorat,

Doctorand,

**Prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru Nedelcu
dr hab. inż. Marcin Adamiak, prof. PŚ**

ing. Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)

Iași – 2025

Mulțumiri

La finalul acestui demers științific, mă simt onorată să adresez cuvinte de mulțumire sincere către toți cei care m-au ajutat și îndrumat de-a lungul stagiului de doctorat.

Doresc să aduc în primul rând mulțumiri speciale coordonatorilor mei științifici, domnului Prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru Nedelcu și dr. hab. inž. Marcin Adamiak, prof. PŚ pentru permanenta lor îndrumare, încurajare și sprijinire pe întreaga perioadă de pregătire a tezei de doctorat.

Mulțumirile mele se întreprind și către domnul Conf. dr. ing. Constantin Cărașu și Asist.univ.dr.fiz. Simona-Nicoleta Mazurchevici pentru sfaturile pertinente și observațiile valoroase oferite.

Cu deosebită stimă mulțumesc și domnilor Conf. dr. ing. Ciprian Dumitru Ciofu, Conf. dr. ing. Florin Susac și Sl. dr. ing. Mihai Boca pentru recomandările primite ca membri ai comisiei de îndrumare.

Distinșii profesori, Prof. univ. dr. ing. Alexandru Sălceanu, Prof. univ. dr. ing. ec. Cristian Doicin, Prof. univ. dr. ing. Nicușor Baroiu, Conf. dr. ing. Ciprian – Dumitru Ciofu, s-au aplecat asupra lucrării mele, iar recomandările domniilor lor au contribuit la îmbunătățirea tezei de doctorat. Vă mulțumesc domnilor profesori și pentru acceptul de a face parte din comisia de susținere publică a tezei de doctorat.

Nu în ultimul rând, vreau să mulțumesc familiei mele și persoanelor apropiate care m-au sprijinit și încurajat pe tot parcursul studiilor doctorale.

În demersul meu științific mi-a fost permanent alături soțul meu, iar un simplu mulțumesc nu este suficient pentru toată răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă în această perioadă, foarte aglomerată, dar extrem de interesantă, în urma căreia volumul meu de cunoștințe s-a dezvoltat semnificativ.

Iași, octombrie 2025

Drd. ing. Petronela- Daniela Rusu (Ostahie)

CUPRINS

	TEZĂ	REZUMAT
CAPITOLUL I STADIUL ACTUAL PRIVIND TEXTURAREA LASER A SUPRAFEȚELOR OBȚINUTE DIN BIOPOLIMERI.....	6	5
1.1. Introducere.....	6	5
1.2. Influența LST asupra proprietăților mecanice.....	11	7
1.3. Îmbunătățirea comportamentului tribologic al suprafețelor.....	21	8
1.4. Analiza proprietăților termice (DSC- Differential Scanning Calorimetry).....	28	9
1.5. Influența LST asupra umectabilității suprafețelor.....	36	10
1.6. Concluzii.....	49	11
CAPITOLUL II OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT ȘI METODOLOGIA CERCETĂRII.....	51	13
2.1. Obiectivele tezei de doctorat.....	51	13
2.2. Analiza sistemică a procesului de texturare laser a suprafețelor din biopolimeri.....	52	13
2.3. Planul experimental	53	14
2.4. Concluzii.....	54	14
CAPITOLUL III ECHIPAMENTE ȘI METODE DE ANALIZĂ UTILIZATE LA TEXTURAREA LASER A A PIESELOR DIN MATERIALE BIODEGRADABILE OBȚINUTE PRIN INJECTARE.....	55	15
3.1. Introducere.....	55	
3.2. Echipamente utilizate la obținerea epruvetelor prin procesul de injectare.....	55	15
3.3. Echipamente utilizate pentru texturarea laser a suprafețelor...	58	15
3.4. Echipamente utilizate pentru analiza proprietăților termice...	59	
3.5. Echipamente utilizate pentru analiza proprietăților tribologice	61	
3.6. Echipament utilizat pentru topografia suprafeței	63	
3.7. Echipament utilizat pentru testarea umectabilității suprafețelor.....	64	
3.8. Concluzii.....	66	15

CAPITOLUL IV	CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND TEXTURAREA LASER A PIESELOR DIN BIOPOLIMERI- ARBOFILL FITCHE.....	67	16
4.1.	Introducere.....	67	
4.2.	Materiale și metode utilizate.....	68	16
4.3.	Rezultate și discuții.....	70	18
4.4.	Concluzii.....	87	
 CAPITOLUL V	 CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND TEXTURAREA LASER A PIESELOR DIN BIOPOLIMERI- ARBOBLEND V2 NATURE.....	 89	 27
5.1.	Introducere.....	89	
5.2.	Materiale și metode utilizate.....	91	
5.3.	Rezultate și discuții.....	94	27
5.4.	Concluzii.....	116	
 CAPITOLUL VI	 CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.	 118	 41
6.1.	Concluzii generale.....	118	41
6.2.	Contribuții originale.....	119	42
6.3.	Direcții viitoare de cercetare.....	119	42
	 LISTA DE LUCRĂRI.....	 121	 44
	REFERINȚE.....	123	45

CAPITOLUL I

STADIUL ACTUAL PRIVIND TEXTURAREA LASER A SUPRAFETELOR OBȚINUTE DIN BIOPOLIMERI

1.1. Introducere

Texturarea reprezintă o multitudine de metode de modificare a profilului suprafeței pieselor cu scopul de a îmbunătăți proprietățile fizice, mecanice, chimice sau tehnologice. Există diferite forme de texturare a suprafețelor: emisfere, cavități eliptice, dreptunghiulare, fagure.

Astfel, prin realizarea unei texturi cu anumite caracteristici (geometria texturii, adâncimea de texturare etc.) se poate obține micșorarea coeficientului de frecare, reducând și uzura pieselor. În unele aplicații se urmărește creșterea gradului de absorbție a luminii, cum ar fi la panourile solare, în altele creșterea durabilității pieselor în contact cum ar fi pompele de petrol.

Texturarea este folosită și la pregătirea suprafețelor înaintea acoperirilor biocompatibile, de exemplu la realizarea unor implanturi din polimeri cu acoperiri de titan sau aur. În acest caz, texturarea favorizează integrarea metalelor pe suprafața piesei.

Texturarea se poate obține prin adăugare de material, prin eliminare de material sau prin deformare plastică.

Pentru texturare pot fi folosite diferite tehnici, dar datorită avantajelor, în cele ce urmează se va aborda texturarea suprafețelor cu laser.

Texturare cu laser este un proces de creare a unor micromodele pe suprafața de contact a piesei de prelucrat. Micromodelele des utilizate sunt canelurile liniare, canelurile încrucișate și depresiunile circulare.

Principiul texturării cu laser constă în înlăturarea de material printr-un proces de ablațiune, încălzind excesiv, topind și evaporând substratul de material ce intră în contact cu fasciculul laser. Ablația laser oferă mult mai multă precizie decât se poate obține printr-o gravare obișnuită fără a avea un impact necorespunzător asupra mediului (ca în situația gravării chimice).

Geometria dorită a texturii poate fi obținută prin utilizarea sistemelor optice de scanare, prin care se asigură conducerea fasciculului laser pe suprafața piesei de prelucrat de-a lungul unei traiectorii predefinite. Texturarea suprafeței cu laser este un procedeu cu precizie ridicată care permite un control strict al formei și dimensiunilor microcavităților. Densitatea energetică ridicată permite laserului să proceseze suprafețe din diverse materiale, cum ar fi: oțeluri dure, ceramică și polimeri, [1].

Texturarea suprafeței cu laser (LST) este o metodă utilizată, pe scară largă, [2-5]. pentru asigurarea unor proprietăți funcționale performante suprafețelor, [6, 7]. fiind utilizată în diverse domenii precum: realizarea de implanturi medicale, [8-13]. asigurarea umectabilității suprafețelor, [4, 14-17]. proprietăți optice îmbunătățite, [18, 19]. proprietăți tribologice ridicate, [20, 21]. creșterea aderenței, [22, 23]. transfer de căldură îmbunătățit, [24]. în industria fotovoltaică, [25, 26]. în vopsitorii, [27]. la fabricația sculelor de așchiere, [28, 29]. în îmbinările hibride, [19, 30-34].

Calitatea texturii suprafeței în prelucrarea materialelor este influențată semnificativ de diferiți parametri de proces. Acești parametri joacă un rol esențial în determinarea caracteristicilor finale ale texturii materialului. În ceea ce privește LBT (tratament cu fascicul laser), principalii parametri de proces sunt, printre altele: puterea de ieșire a laserului, durata impulsului, rata de repetare, dimensiunea punctului de fascicul, viteza de scanare și lungimea de undă.

Magnitudinea puterii generate afectează adâncimea și lățimea zonei afectate de căldură, influențând astfel rugozitatea și adâncimea texturii. Impulsurile laser mai scurte conduc adesea la texturi mai fine, în timp ce impulsurile mai lungi pot provoca mai multă topire și afectează finisajul suprafeței. Rata de repetare mai mare poate influența acumularea de căldură și uniformitatea generală a texturii, având un impact asupra calității suprafeței. Dimensiunea punctului fasciculului laser determină zona de interacțiune, afectând precizia și rezoluția modelului texturii. Viteza cu care fasciculul de laser se deplasează pe material, utilizând un scanner cu cap de fascicul laser, impactează distribuția căldurii și ritmurile de răcire, influențând calitatea texturii suprafeței. Un alt parametru foarte important este lungimea de undă a fasciculului. Diferitele lungimi de undă ale laserului au rate de absorbție variate în materiale, afectând modul în care acestea interacționează și, astfel, influențând textura rezultată, [53].

Printre parametrii examinați, viteza de scanare s-a dovedit a fi cea mai influentă, urmată de frecvența impulsului, în timp ce densitatea de energie a avut un impact minim. Eliminarea materialului în timpul LBT sau procesul de ablație laser apare din generarea de nanoparticule atunci când pulsul laser concentrat încălzește și topește materialul vizat, așa cum este ilustrat în figura 1.1, [54].

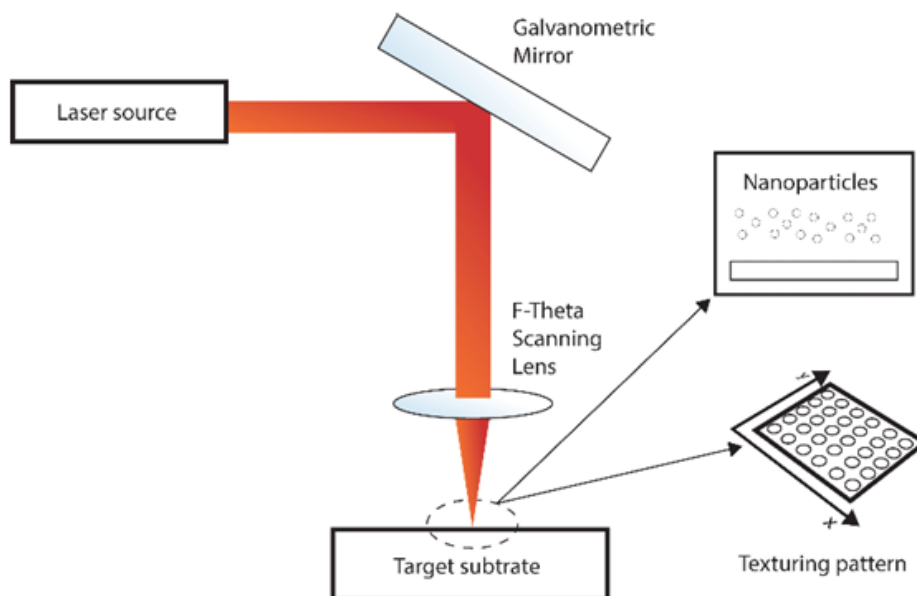


Fig. 1.1. Laser texturing process, [54].

1.2. Influența LST asupra proprietăților mecanice

Avantajele LST fac ca procedeul să fie o alternativă superioară altor procedee de prelucrare a suprafețelor. În general, comportarea polimerilor la raza laser este influențată de natura polimerului și de parametrii fascicului laser, [56].

Magdalena Tomanik și alții, [57], au evaluat efectul iradierii cu laser CO₂ a filmelor subțiri de poli (L-lactidă) (PLLA) asupra microdureității unde putem observa cum aceasta crește semnificativ de la Ref la F2, ceea ce indică o întărire a suprafeței la fluente mai mici și medii. La F3 (fluența mare), scade dramatic, ceea ce indică o degradare termică a structurii polimerului, făcându-l mai moale (figura 1.2).

Proprietățile micromecanice au fost examinate în timpul unui test de indentare cu parametri constanți pentru fiecare tip de probă. Parametrii obținuți au fost caracteristici pentru toate tipurile de materiale texturate și au indicat o relație specifică cu fluentele acumulate (tabelul 1.2).

Tabelul 1.2. Proprietăți micromecanice: medie și abatere standard ($X \pm SD$), determinate prin testul de indentare pentru proba de referință și cele texturate, [57].

Tip de specimen	E_{IT} (GPa)	H_{IT} (MPa)	HV	hm (μ m)	We (nJ)	Wp (nJ)
Ref	2.1 ± 0.9	200.5 ± 53.2	18.9 ± 5.0	6.1 ± 0.9	116.0 ± 46.7	145.7 ± 27.3
F1	3.4 ± 0.8	300.2 ± 54.9	28.3 ± 5.2	4.7 ± 0.5	80.6 ± 13.0	113.4 ± 5.6
F2	4.1 ± 1.0	429.6 ± 205.8	40.5 ± 19.4	4.3 ± 0.7	73.6 ± 7.3	117.3 ± 9.3
F3	0.4 ± 0.03	115.9 ± 17.7	10.9 ± 1.7	1.2 ± 0.4	376.6 ± 40.2	166.7 ± 25.0

Legend: E_{IT} - Young's modulus, H_{IT} - instrumented microhardness, HV -Vickers microhardness, hm - maximum indentation depth, We - elastic deformation energy, Wp - plastic deformation energy.

Toți parametrii mecanici au prezentat modificări treptate, tendința menținându-se pentru toate valorile obținute. Cu toate acestea, la valoarea energiei de 71 J/cm², toate cazurile au prezentat schimbări rapide (abrupte) ale comportamentului. Iradierea PLLA a afectat suprafața

materialului prin creșterea durității și rigidității sale. Energiile de deformare plastică și elastică au scăzut treptat, iar rezistența materialului din partea suprafeței iradiate a crescut. Cea mai mare energie utilizată a modificat puternic comportamentul mecanic al specimenului PLLA. Adâncimea maximă în timpul testării a fost de aproape două ori mai mare comparativ cu probele de referință și de trei ori mai mare comparativ cu probele iradiate cu o fluență de 48 J/cm^2 . PLLA a devenit semnificativ mai deformabil și mai plastic decât materialul de referință. Acest fenomen este vizibil în relațiile dintre forța de indentare și adâncimea de indentare (figura 1.2). Curbele mecanice obținute pentru epruvetele iradiate cu fluențele F_1 și F_2 au fost deplasate ca urmare a testelor de indentare spre adâncimi mai mici în raport cu epruvetele de referință, demonstrând în același timp natura mai rigidă a suprafeței de testare. Relațiile dintre forța de indentare și adâncime pentru probele PLLA iradiate cu 71 J/cm^2 au fost deplasate în direcția opusă tuturor celorlalte curbe.

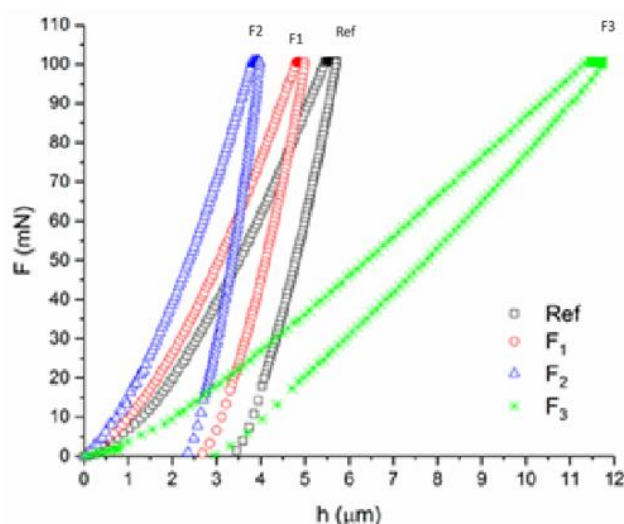


Fig. 1.2. Sarcini tipice vs. curbe de adâncime de indentare pentru probe PLLA de referință și iradiate, [57].

În rezultatele prezentate, duritatea superficială a polimerului a crescut pentru grupurile F_1 și F_2 și s-a redus în cazul F_3 , modificând în același timp topografia și umectabilitatea suprafeței.

Microduritatea a fost repetată de 10 ori în diferite locații de pe suprafața tratată cu laser, iar eroarea estimată din datele de duritate este de ordinul a 0,9 HV. Variația microdurității la suprafață este asociată cu vitezele de răcire neuniforme și distribuția neuniformă a dimensiunilor cristalelor la suprafață. Cu toate acestea, îmbunătățirea microdurităților este asociată cu structurile cristaline formate la suprafață și vitezele ridicate de răcire, ceea ce scade dimensiunea cristalului în regiunea de suprafață. În consecință, se obține o suprafață cristalină densă după procesul de tratament cu laser.

1.3. Îmbunătățirea comportamentului tribologic al suprafețelor

Ultimii ani au adus preocupări intense în utilizarea laserului în scopul îmbunătățirii comportamentului tribologic al cuplelor de frecare cu materiale metalice: aliere, [63]. depunere, [64]. texturare, [65]. Sistemele laser sunt o alternativă la tratamentele convenționale de suprafață, datorită densității mari de energie și poziționării precise. În funcție de cantitatea de energie transmisă și de timpul de expunere, se poate realiza o gamă largă de tratamente de suprafață (în stare solidă/ lichidă, cu/ fără îndepărtarea materialului), aplicate la toate categoriile de materiale: metale, ceramică, polimeri, compozite etc., [66].

A. Han și alții, [66]. au analizat aplicarea laserelor pentru îmbunătățirea caracteristicilor tribologice ale suprafețelor polimerice. S-a aplicat un tratament de texturare (gravuri paralele, caracterizate prin lățimea l , adâncimea h și pasul p) prin îndepărtare de material cu un laser CO_2 , de pe suprafața eșantioanelor de policarbonat. Influența texturii realizate asupra comportamentului tribologic a fost demonstrată în cadrul unor încercări de frecare (alunecare), utilizând cupla de frecare cilindru (oțel) pe plan (policarbonat).

Pentru evidențierea comportamentului tribologic s-au creat două tipuri de hărți: CSL (figura 1.17) și HRM, prima precizează condițiile mecanice de contact la un moment dat, iar cea de-a doua hartă precizează mecanismele de degradare a corpurilor în contact.

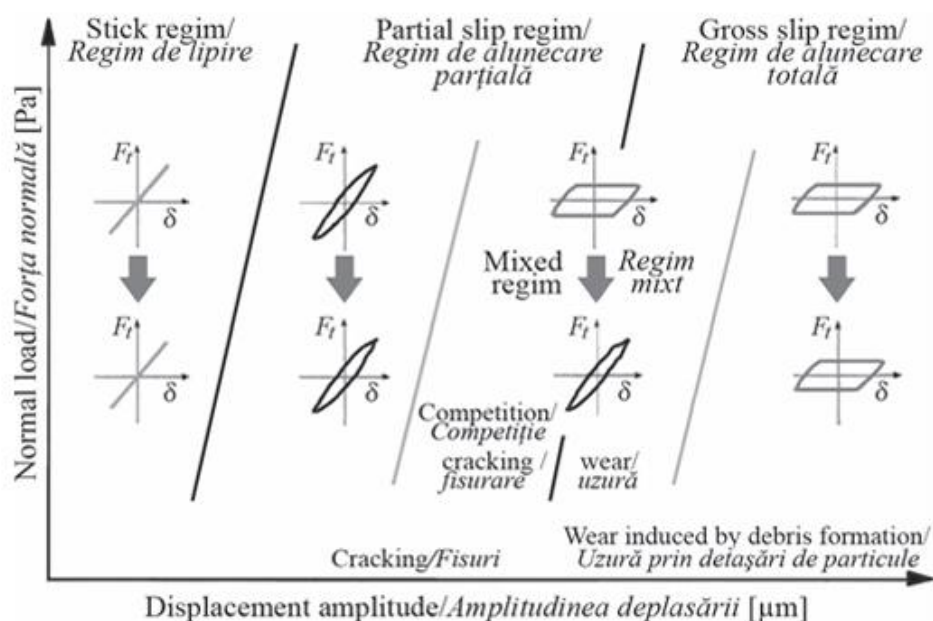


Fig. 1.17. Fretting maps, [66].

Astfel s-a arătat că cele mai importante mecanisme care guvernează comportamentul tribologic al materialelor polimerice sunt adeziunea, abraziunea și oboseala. În consecință, degradarea se manifestă prin apariția de rizuri, fisuri și detașări de particule. Un comportament special a fost dovedit pentru poliamidă și policarbonați prin apariția unor ondulații pe suprafață, [66].

Spre deosebire de comportamentul tribologic al materialelor metalice, în cazul polimerilor s-a observat o influență semnificativă a frecvenței micilor deplasări asupra inițierii fisurilor, [10, 11].

1.4. Analiza proprietăților termice (DSC- Differential Scanning Calorimetry).

Stabilitatea termică a polimerilor este în general ridicată, pierderile semnificative în greutate apărând la temperaturi mai mari de 350 °C, în funcție de structura chimică. Temperaturile de tranziție sticloasă (T_g) variază în funcție de compoziția moleculară și de natura segmentelor copolimerice, [69]. Cunoașterea proprietăților termice ale polimerilor este esențială pentru dezvoltarea celor mai bune metode de procesare a materialelor în produse utile și pentru prezicerea performanței pe durata de viață a produsului.

În figura 1.25 se prezintă micrografii optice și SEM ale suprafeței din policarbonat tratate cu laser, [70].

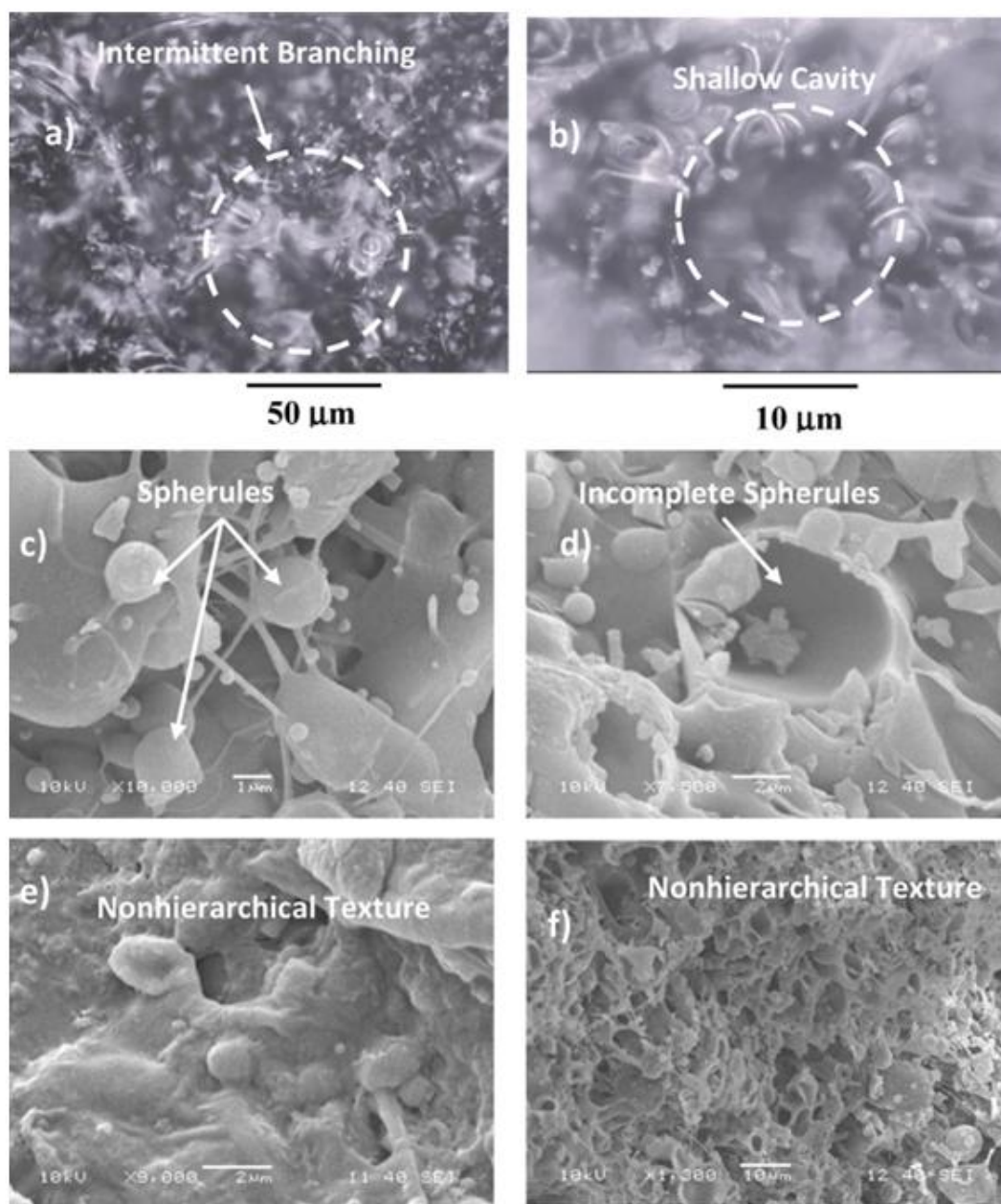


Fig. 1.25. Optical images and SEM micrographs of laser treated surface: (a) optical image demonstrating the crystals formed at the surface and radial growth of crystals and intermittent branching, (b) laser produced fine size shallow cavity and spherules, (c) spherules formed at the surface, (d) incomplete spherules, and (e and f) nonhierarchical texture, [70].

1.5. Influența LST asupra umectabilității suprafețelor

Texturarea cu laser este o tehnică utilizată pentru modificarea umectabilității suprafeței diferitelor materiale, [76].

Această proprietate este exprimată în mod obișnuit prin unghiul de contact (CA), adică unghiul format de interfața lichid-vapori (de obicei, apa este fluidul de testare) cu o suprafață solidă (figura 1.39).

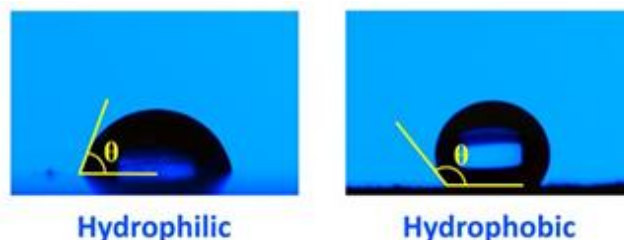


Fig. 1.39. Unghiul de contact pentru materiale hidrofile ($\theta < 90^\circ$), [76]

Yailbas și alții, [70], au analizat hidrofobitatea pentru sticla de polycarbonat realizată prin ablație laser controlată la suprafață folosind un laser CO₂ și au obținut o îmbunătățire a acestei proprietăți. Testele de tratament cu laser au fost repetate de mai multe ori prin considerarea diferiților parametri laser și au fost selectați parametrii care au condus la calitatea dorită a suprafeței în sensul umezirii. Condițiile de tratament cu laser sunt prezentate în Tabelul 1.5.

Tabelul 1.5. Laser treatment conditions used

Scanning speed (mm/min)	Peak power (W)	Frequency (Hz)	Nozzle gap (mm)	Nozle diameter (mm)	Focus setting (mm)	Argon pressure (kPa)
600	2000	1500	1.5	1.5	127	600

1.6. Concluzii

Texturarea laser reprezintă o tehnologie avansată și versatilă, cu multiple aplicații în diverse industrii, datorită capacității sale de a modifica precis proprietățile funcționale ale suprafețelor din biopolimeri. Această metodă se bazează pe procese de ablație controlată, care permit obținerea unor microstructuri geometrice în funcție de cerințele aplicațiilor specifice. Printre principalele avantaje ale texturării laser se numără precizia ridicată, impactul ecologic redus și eliminarea necesarului de consumabile, comparativ cu alte metode convenționale, precum gravura chimică sau sablarea abrazivă.

Texturarea laser influențează semnificativ proprietățile mecanice ale biopolimerilor, rezultatele depinzând de natura materialului și de parametrii laser utilizați (puterea fasciculului, lungimea de undă, viteza de scanare, numărul de treceri, distanța focală și densitatea de energie). De exemplu, iradierea polimerilor cu fluențe reduse sau medii poate crește duritatea și rigiditatea

materialului, în timp ce fluențele ridicate pot induce fenomene de fragilizare. Studiile efectuate au demonstrat că texturile liniare sunt cele mai eficiente pentru îmbunătățirea rezistenței mecanice a îmbinărilor adezive, obținând creșteri semnificative ale forței la rupere.

Un alt efect major al texturării laser constă în reducerea coeficientului de frecare și creșterea rezistenței la uzură a suprafețelor polimerice. Structurile microscopice, precum texturile liniare sau reticulate, facilitează interacțiunea dintre suprafețe, reducând uzura și frecarea cu până la 30% față de materialele netexturate. Aceste rezultate subliniază potențialul texturării laser în aplicații industriale, cum ar fi componentele auto sau implanturile medicale.

Proprietățile termice ale biopolimerilor sunt de asemenea influențate de tratamentele laser. Modificările structurale observate, precum creșterea gradului de cristalinitate sau reducerea pragului de ablație, permit utilizarea materialelor în aplicații care necesită stabilitate termică sporită. Studiile asupra HDPE și PET au evidențiat că tratamentele laser pot reduce cristalinitatea sau pot induce ablație controlată, în funcție de parametrii folosiți.

Un alt aspect remarcabil al texturării laser este capacitatea de a modifica umectabilitatea suprafețelor, prin reglarea parametrilor laser. Această metodă permite obținerea de suprafețe superhidrofobe sau superhidrofile, aspect esențial pentru aplicații precum ambalajele auto-curătabile, textilele sau implanturile medicale. Experimentele au demonstrat că suprafețele texturate pot reduce aderența bacteriană și pot îmbunătăți auto-curățarea prin efectul de tip „lotus”.

Texturarea laser a biopolimerilor și-a demonstrat utilitatea într-o varietate de domenii, precum biomedicină, microelectronică, industria auto și fotovoltaică. De exemplu, implanturile medicale texturate cu laser prezintă o biocompatibilitate crescută, cu rate de integrare celulară mai mari comparativ cu cele netexturate. Începând de la îmbunătățirea eficienței energetice a dispozitivelor microelectronice până la optimizarea proprietăților tribologice ale componentelor auto, texturarea laser este o tehnologie esențială în dezvoltarea de materiale sustenabile și performante.

Texturarea laser a suprafețelor din biopolimeri reprezintă o soluție inovatoare și eficientă pentru îmbunătățirea proprietăților materialelor, contribuind la sustenabilitate și la avansul tehnologic în multiple industrii. Prin controlul precis al parametrilor prelucrării cu laser, se pot crea suprafețe adaptate pentru aplicații diverse, de la ambalaje biodegradabile la implanturi medicale avansate. Această tehnologie continuă să deschidă noi orizonturi pentru cercetare și inovație.

CAPITOLUL II

OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT ȘI METODOLOGIA CERCETĂRII

2.1. Obiectivele tezei de doctorat

În vederea realizării obiectivului principal al tezei de doctorat, a fost necesară stabilirea unor obiective secundare, după cum urmează:

- fundamentarea științifică și tehnologică a temei de cercetare;
- efectuarea unei analize sistemice a procesului de texturare laser a materialelor polimerice, pornind de la parametrii procesului și influența acestora asupra microstructurii și performanței funcționale;
- realizarea reperelor prin injectare în matriță din cele două materiale biodegradabile selectate, Arbofill Fichte și Arboblend V2 Nature;
- elaborarea unei metodologii experimentale pentru texturarea cu laser, incluzând stabilirea parametrilor variabili ai procesului (număr de treceri, intensitate, viteză de scanare, distanță focală) și a modelului geometric aplicat (hexagonal și pătrat);
- aplicarea tratamentului de texturare cu laser utilizând parametri variabili pentru a obține microstructuri distincte pe suprafața probelor;
- caracterizarea suprafețelor texturate din punct de vedere tribologic și morfologic, prin evaluarea unghiului de contact (WCA), a coeficientului de frecare (COF), a rezistenței la uzură și a microtopografiei;
- prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale, prin utilizarea tehnicilor specifice (microscopie optică digitală, SEM, măsurători de rugozitate Ra, teste de uzură și unghiul de contact);
- corelarea structurii suprafeței cu performanțele tribologice, în scopul stabilirii influenței directe a texturării laser asupra comportamentului de suprafață al biopolimerilor biodegradabili.

2.2. Analiza sistemică a procesului de texturare laser a suprafețelor din biopolimeri

Texturarea laser a suprafețelor reprezintă o metodă avansată de prelucrare a suprafețelor materialelor, utilizând energia focalizată a fasciculului laser pentru a crea modele micro- și nano-structurate. Analiza sistemică are în vedere stabilirea și corelația dintre factorii de intrare, parametrii de proces și efectele rezultate asupra suprafețelor probelor din biopolimerii Arboblend V2 Nature și Arbofill Fichte. Tehnologia utilizată, bazată pe un laser picosecundă A-355, a permis formarea de structuri geometrice regulate pe suprafața probelor din Arboblend V2 Nature și Arbofill Fichte.

Parametrii procesului (geometrie, treceri, energie, frecvență) influențează direct:

- comportamentul tribologic;
- hidrofobicitatea/ hidrofilicitatea;
- stabilitatea termică și degradarea;
- rugozitatea și morfologia.

2.3. Planul experimental

Planul experimental a fost conceput pentru a analiza influența parametrilor de texturare laser asupra proprietăților de suprafață ale biopolimerului biodegradabil Arbofill Fichte și Arboblend V2 Nature.

Obținerea probelor necesare tratamentului de texturare cu fascicul laser s-a realizat prin injectare în matriță, folosind echipamente specifice prelucrării termoplastice. Probele astfel obținute au avut formă rectangulară, cu dimensiuni standardizate de $70 \times 50 \times 10$ mm, utilizate la testările tribologice, structurale și de degradare.

2.4. Concluzii

Pentru atingerea obiectivelor stabilite cercetările pot fi grupate în două mari etape, după cum urmează: prima etapă, în care se va realiza texturarea suprafețelor probelor din Arboblend V2 Nature și Arboblend Fichte folosind un laser A-355 picosecunde, aplicând patru și șase treceri cu modele hexagonale și pătrate și, a doua etapă, evaluarea proprietăților suprafețelor obținute, prin: observații microscopice, teste de umectabilitate, teste de uzură, microscopie electronică cu scanare (SEM), teste de degradare și topografie.

CAPITOLUL III

ECHIPAMENTE ȘI METODE DE ANALIZĂ UTILIZATE LA TEXTURAREA LASER A A PIESELOR DIN MATERIALE BIODEGRADABILE OBȚINUTE PRIN INJECTARE

3.2. Echipamente utilizate la obținerea epruvetelor prin procesul de injectare

În vederea obținerii probelor prin injectare a fost utilizată mașina SZ 600H iar pentru șlefuire și lustruire a suprafețelor s-a utilizat mașina de șlefuire și lustruire TERGAMIN-30, ambele disponibile în cadrul laboratorului de Mecanică Fină și Nanotehnologii, Departamentul de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași.

3.3. Echipamente utilizate pentru texturarea laser a suprafețelor

Texturarea laser a suprafețelor probelor din biopolimeri au fost efectuate pe echipamentul laser cu picosecunde A-355 din cadrul Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, Institute of Engineering Materials and Biomaterials.

3.8. Concluzii

În cadrul cercetărilor probele utilizate pentru texturare cu laser au fost obținute prin injectare în matriță pe echipamentul de injectare SZ-600H, aflat în dotarea laboratorului de Mecanică Fină și Nanotehnologii, Departamentul de TCM, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași. Materialele polimerice biodegradabile utilizate au fost Arboblend V2 Nature și Arbofill Fichte achiziționate de la producătorul german de materiale biopolimerice Tecnar.

În funcție de caracteristicile urmărite a fi măsurate pentru probele texturate, au fost utilizate echipamente moderne și performante de măsurare. Mai mult, unele echipamente au în dotare pachete software specifice, care au permis înregistrarea și redarea datelor în timp real. Infrastructură de cercetare utilizată în cadrul cercetărilor experimentale este disponibilă la Facultatea de Construcții de Mașini și Management Industrial și Facultatea de Mecanică din Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași și Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Gliwice, Poland.

CAPITOLUL IV

CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND TEXTURAREA LASER A PIESELOR DIN BIOPOLIMERI- ARBOFILL FITCHE

4.2. Materiale și metode

4.2.1. Pregătirea probei

Probele utilizate pentru texturare au fost obținute prin turnare prin injecție folosind o mașină de injecție SZ-600H (Shen Zhou, Zhangjiagang, China). Pentru a obține rezultate de o calitate mai bună, pentru fiecare probă a fost utilizată o pregătire omogenizată. Înainte de microprelucrarea cu laser, procesul de finisare mecanică a fost realizat utilizând o mașină de șlefuit-polisat cunoscută sub numele de TERGAMIN-30 (Struers, Willich, Germania). Fiecare probă a fost mecanic și lustruită secvențial cu hârtie cu gradații granulometrice de 500, 800 și 1200 grilă/mm² timp de $t = 4$ min per gradient, apoi lustruită mecanic cu ajutorul roților de lustruire, cu gradații de 9, 3 și 1 μm .

4.2.2. Texturarea suprafeței cu laser (LST)

Procesul de texturare a suprafeței a utilizat un sistem laser în picosecunde A-355 (Oxford Lasers Ltd., Didcot, Regatul Unit), cu un laser în picosecunde în stare solidă pompat prin diodă cu lungimea de undă de 335 nm.

4.2.3. Observație microscopică

Structura geometrică a suprafețelor probelor și urmele de uzură au fost analizate cu ajutorul unui microscop digital Leica DVM6 (DM), Wetzlar, Germania.

4.2.4. Testul de umezire

Măsurătorile unghiului de contact (θ) au fost efectuate folosind metoda picăturii așezate pentru a determina umectabilitatea suprafețelor probelor testate. În acest scop, a fost utilizat un tensiometru Biolin Scientific Attension Theta Flex (Hangpilsgatan 7, Vastra Frolunda, Vastra Gotaland County 42677, SE).. Măsurătorile unghiului de contact au fost efectuate în funcție de timp (60 s) într-o serie de 3 măsurători pentru fiecare probă. Măsurătorile au fost efectuate la o temperatură ambiantă de 289 K (25 °C).

4.2.5. Test de uzură

Proprietățile tribologice ale probelor testate au fost investigate utilizând metoda bilă-placă, cu ajutorul unui tribometru CSM (CSM Instruments, Needham, MA, SUA). Ca contraprobă, a fost utilizată o bilă ceramică din Al_2O_3 cu un diametru de 6 mm. Au fost utilizate sarcini normale de 4 N. Lungimea cursei a fost stabilită la 6 mm, iar frecvența a fost de 1 Hz, creând o viteză de alunecare de 1,2 cm/s.

4.2.6. Test de degradare

Testul de degradare a fost efectuat utilizând o cameră climatică WKL 100/40-Weiss în conformitate cu standardul PN-EN 600068-14, [98]. Parametrii de testare au fost după cum urmează:

- Etapa I: Scăderea temperaturii $T \downarrow$ până la $T = -5^\circ\text{C}$, $t = 1\text{ h}$;
- Etapa II: Îmbătrânire: $T = -5^\circ\text{C}$, $t = 3\text{ h}$;
- Etapa III: Creșterea temperaturii $T \uparrow$ până la $T = 50^\circ\text{C}$, $\text{HD} = 90\%$, $t = 1\text{ h}$;
- Etapa IV: Îmbătrânire, $T = 50^\circ\text{C}$, $\text{HD} = 90\%$, $t = 3\text{ h}$.

Morfologia suprafeței după testul de degradare a suprafețelor probei și urmele de uzură au fost analizate cu ajutorul unui microscop digital Leica DVM6 (DM).

4.2.7. Analiza DSC

Stabilitatea termică a probelor a fost determinată prin calorimetrie diferențială cu baleiaj (DSC) folosind un calorimetru NETZSCH, DSC 200 F3 Maia, cu o precizie a temperaturii de 0,1 K, o sensibilitate sub $1\text{ }\mu\text{W}$ și o precizie a entalpiei sub 1%. Calibrarea a fost efectuată cu Hg, Bi, In, Sn și Zn în conformitate cu standardele. Încălzirea a fost efectuată între RT (temperatura camerei) și 180°C pentru toate probele folosind o rată de încălzire de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Au fost tăiate fragmente de probe care cântăreau mai puțin de 30 mg și au fost investigate sub o atmosferă protectoare cu Ar. Termogramele DSC rezultate, care cuprind variațiile fluxului de căldură în funcție de temperatură, au fost evaluate cu software-ul Proteus v.6.1.

4.2.8. Topografie

Un profilometru de tip Zegage a fost utilizat pentru a determina topografia suprafețelor. Având în vedere valorile mici ale rugozității suprafețelor măsurate utilizate pentru determinări, a fost utilizat un ocular cu o mărire de 10X. Acesta avea un câmp vizual (FOV) de 0,83/0,83 mm și o rezoluție laterală de 0,815 micrometri. Rezoluția laterală a profilometrului în distingerea a două puncte a fost o distanță minimă 0,815 micrometri între ele pe suprafața măsurată.

4.3. Rezultate și discuții

4.3.1. Observație microscopică

Morfologia de suprafață a probelor după procesul de texturare cu laser a fost cea prezentată în figurile 4.1 și 4.2.

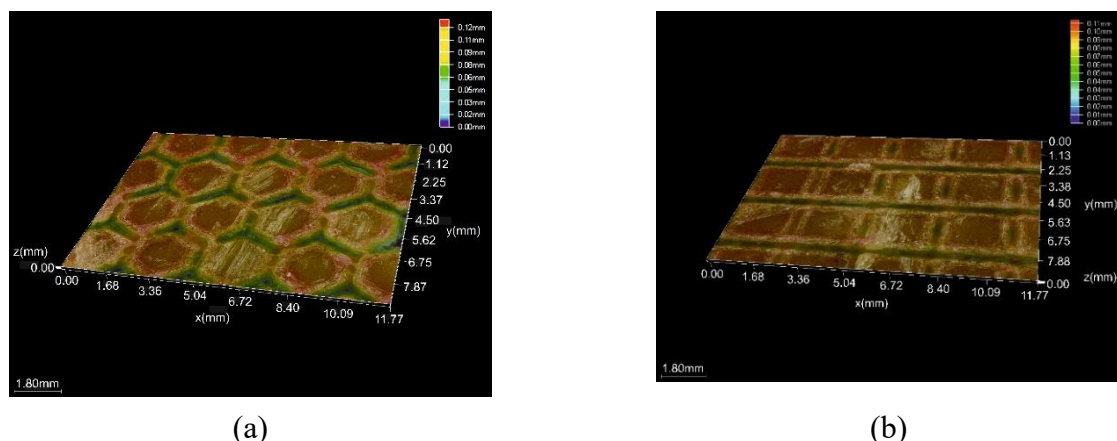


Fig. 4.1. Observarea microscopică a biopolimerului biodegradabil după procesul de texturare cu laser (a) 4x_H x300, (b) 4x_S x300

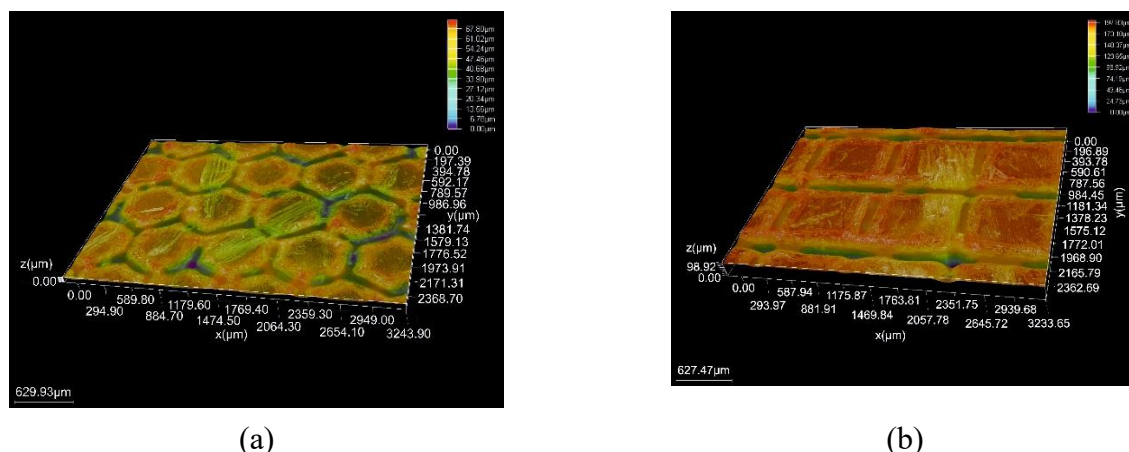


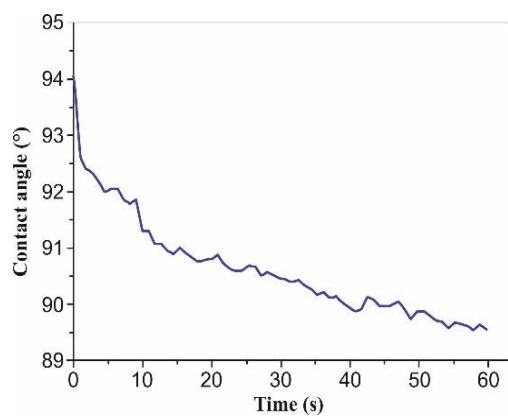
Fig. 4.2. Observarea microscopică a biopolimerului biodegradabil după procesul de texturare cu laser (a) 6x_H x300, (b) 6x_S x300

4.3.2. Testul de umezire

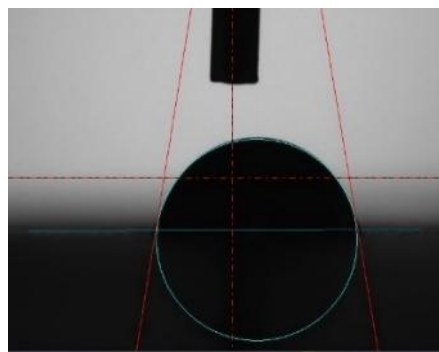
Unghiul mediu de contact cu apă distilată pentru probe în starea lor inițială a fost de $87 \pm 3^\circ$ (figura 4.3a, b), indicând o suprafață slab hidrofoabă (unghi de contact apropiat de 90°). Pentru probele cu o textură hexagonală creată folosind patru treceri cu laser (4x), unghiul mediu de contact cu apa a scăzut la $38 \pm 2^\circ$, reflectând o suprafață hidrofilă (figura 4.3c, d).

În schimb, probele cu o textură pătrată prelucrate cu același număr de treceri laser (4x) au prezentat un unghi de contact inițial de aproximativ 19° . Acest unghi a scăzut rapid la 0° în decurs de 16 s (figura 4.3e, f), demonstrând dezvoltarea proprietăților superhidrofile la umezirea

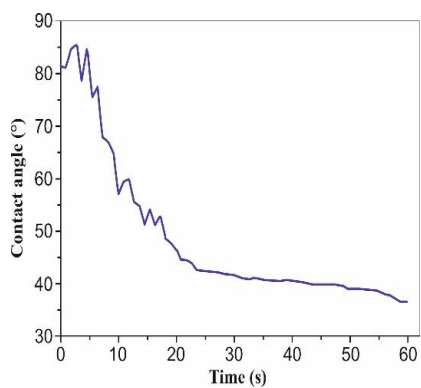
suprafeței (tabelul 4.2). Un comportament similar al suprafeței a fost observat la probele texturate folosind șase treceri laser (6x), indiferent de tipul de model (hexagonal sau pătrat).



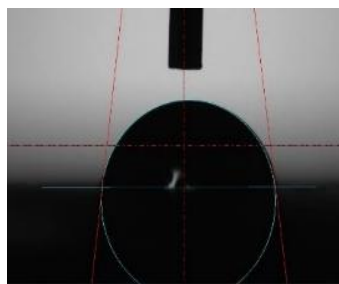
(a)



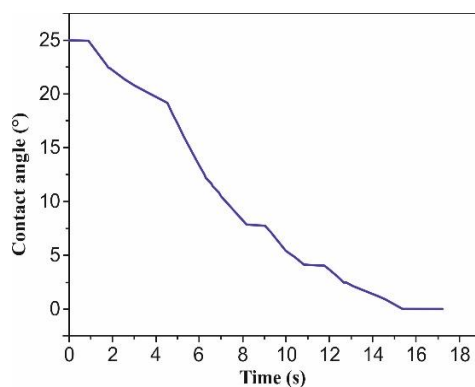
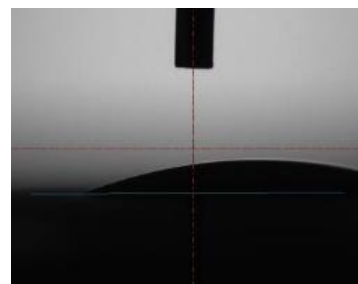
(b)



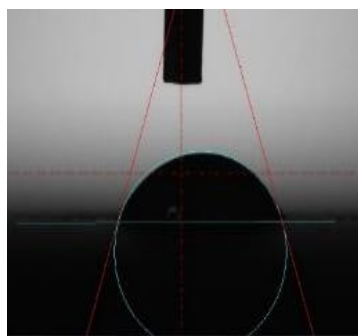
(c)



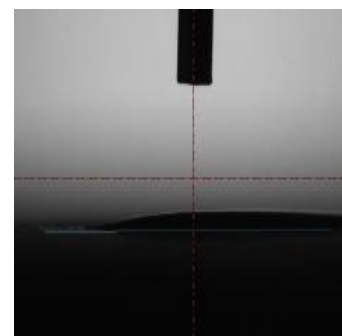
(d)

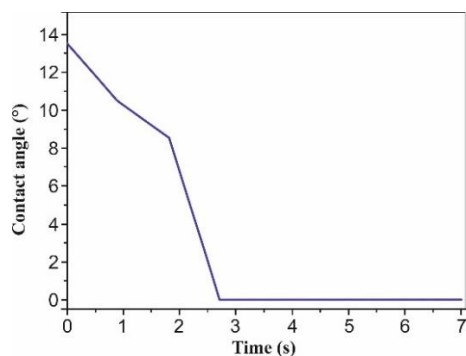


(e)

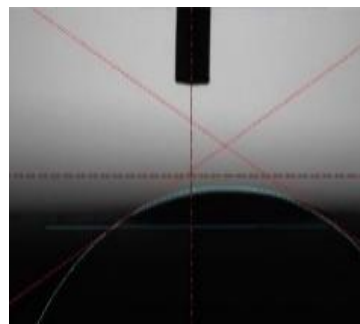


(f)

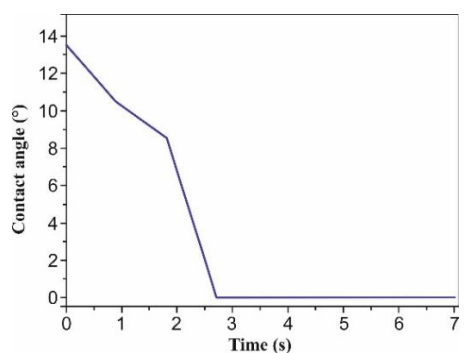
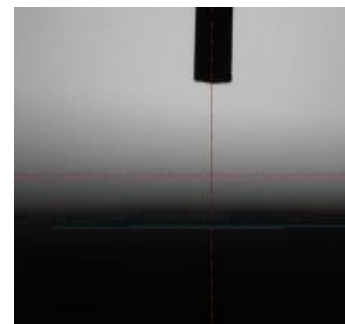




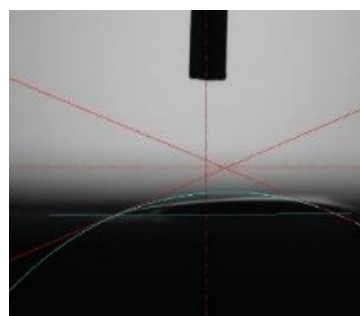
(g)



(h)



(i)



(j)

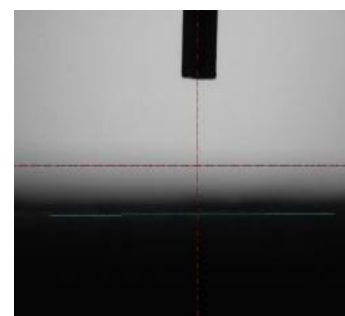


Fig. 4.3. Diagrama unghiului de contact pentru experimentul cu: (a), (b) starea inițială; (c), (d) model cu textură hexagonală 4 treceri; (e), (f) model cu textură pătrată 4 treceri; (g), (h) model cu textură hexagonală 6 treceri; (i), (j) model cu textură pătrată 6 treceri

4.3.3. Test de uzură

Tabelul 4.3 prezintă rezultatele coeficienților de frecare pentru ambele materiale studiate, inclusiv înainte de texturare.

Tabelul 4.3. Valorile COF.

Biopolimer biodegradabil - COF 0,10 stare inițială		COF
4 treceri de texturare	Hexagon	0.20
	Pătrat	0.51
6 treceri de texturare	Hexagon	0.26
	Pătrat	0.49

Coeficientul mediu de frecare (COF) pentru biopolimerul biodegradabil în starea inițială a fost de 0,10 (figura 4.4a).

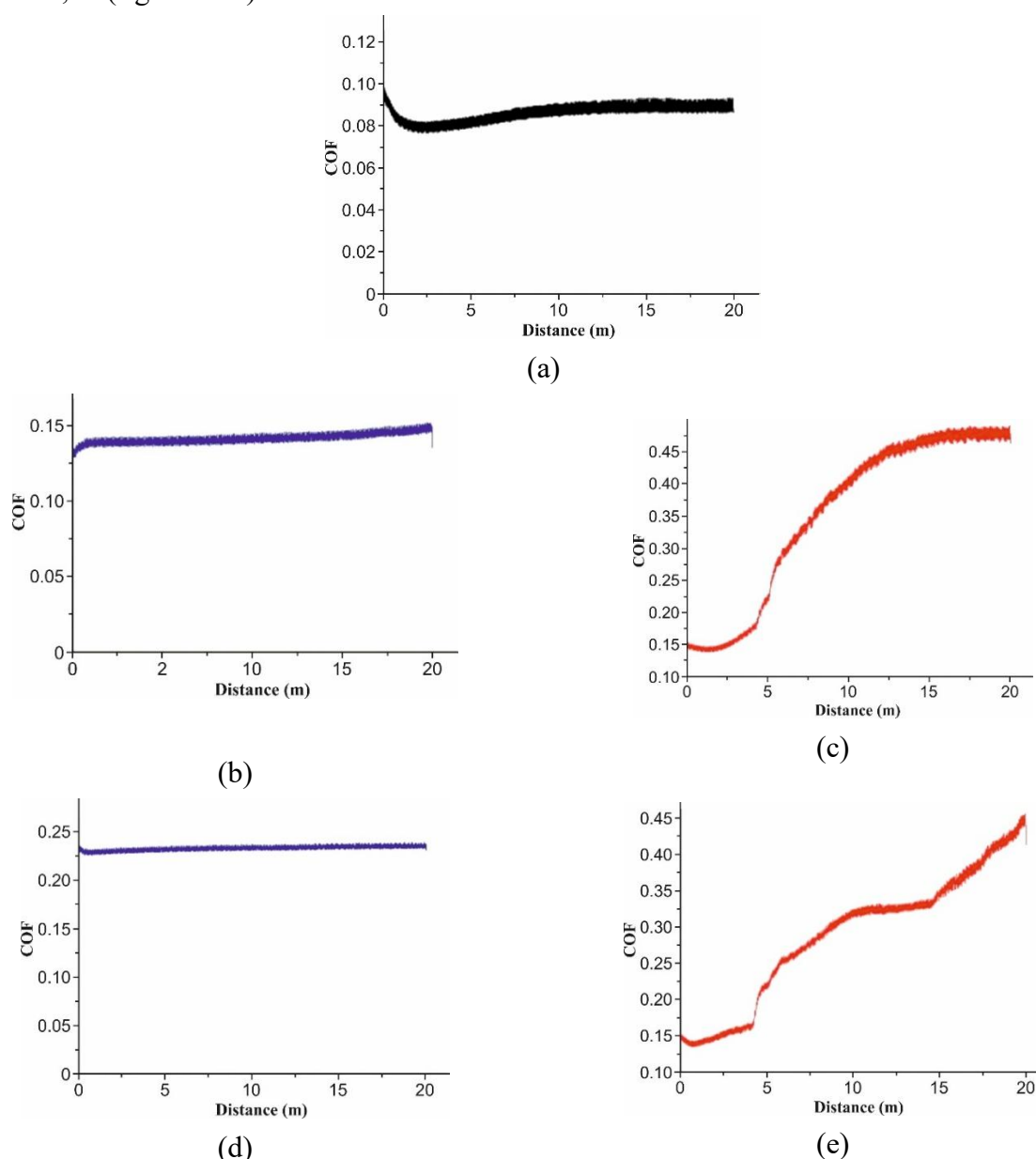


Fig. 4.4. Rezultatele testelor COF pentru biopolimer biodegradabil: (a) material de bază, (b) 4x_H, (c) 4x_S, (d) 6x_H, (e) 6x_S

4.3.4. Test de degradare

Pe baza măsurărilor de greutate obținute înainte și după testul de degradare, s-a observat o creștere a greutății pentru toate probele testate, 0,036 g în cazul a patru treceri și 0,039 în cazul a șase treceri de texturare, după cum se arată în tabelul 4.4. Cu toate acestea, pe baza observării microscopice a tuturor probelor după testul de degradare (figurile 4.6 - 4.8), nu au fost vizibile produse de degradare.

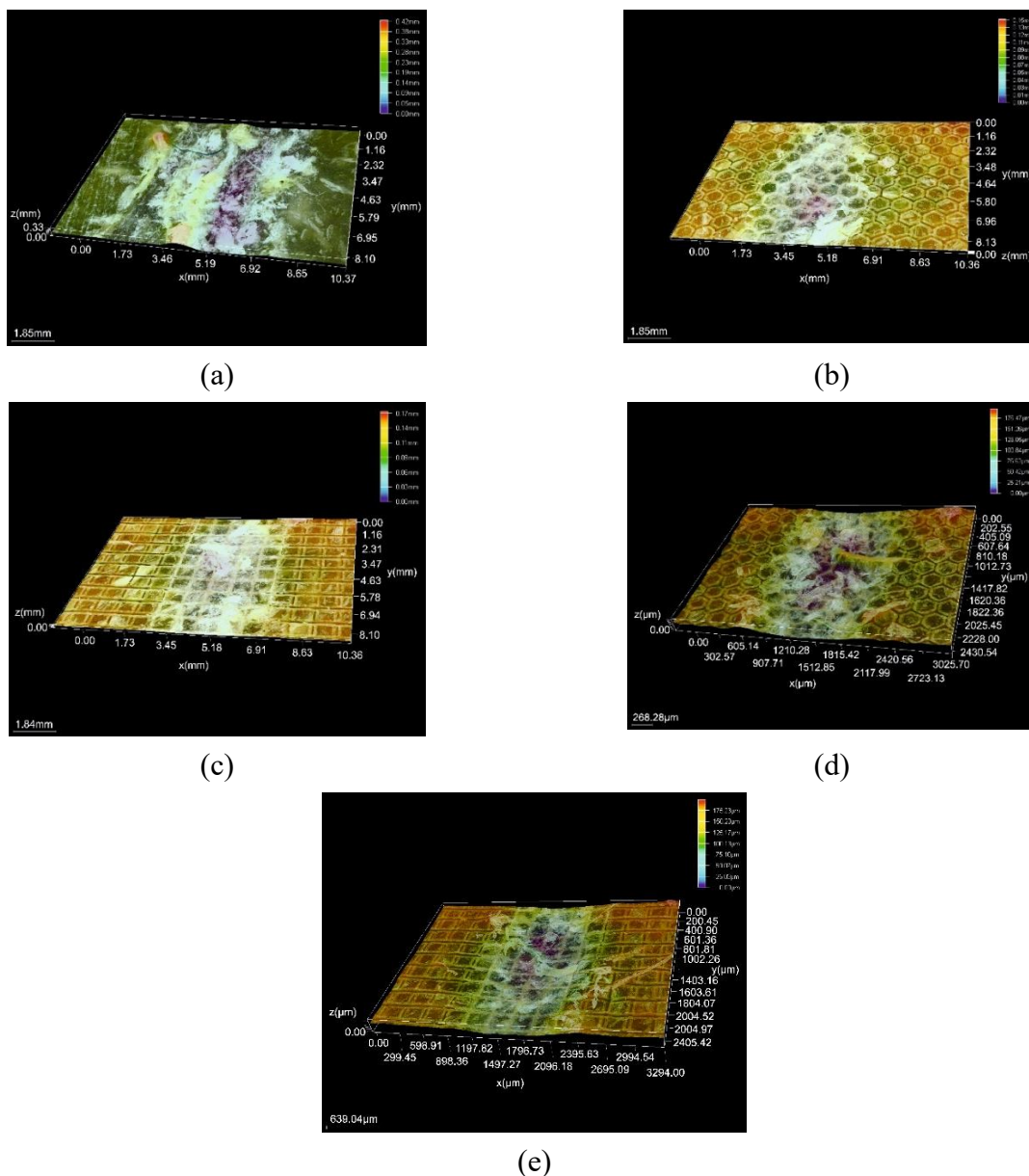


Fig. 4.5. Morfologia urmei de uzură a grupului de probe de biopolimer biodegradabil: (a) material de bază x100; (b) 4x_H x100; (c) 4x_S x100; (d) 6x_H x100; (e) 6x_S x100

Tabelul 4.4. Rezultatele testului de degradare.

Material	Greutate (g)			Diferența
	Înainte de degradare		După degradare	
Polimer biodegradabil	4 treceri de texturare	30.123	30.159	+0.036
	6 treceri de texturare	31.697	31.736	+0.039

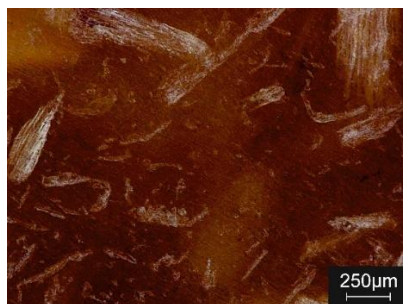


Fig. 4.6. Observarea microscopică a polimerului biodegradabil netexturat cu laser în starea inițială după testul de degradare



(a)



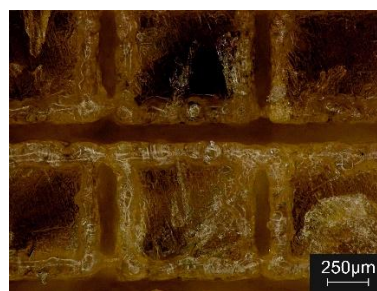
(b)

Fig. 4.7. Observarea microscopică a Arbofill Fichte texturat cu laser după testul de degradare:

(a) 4x_H; (b) 4x_S



(a)



(b)

Fig. 4.8. Observarea microscopică a polimerului biodegradabil texturat cu laser după testul de degradare: (a) 6x_H; (b) 4x_S

4.3.5. Analiza DSC

Termogramele DSC înregistrate în timpul încălzirii sunt ilustrate în figura 4.9.

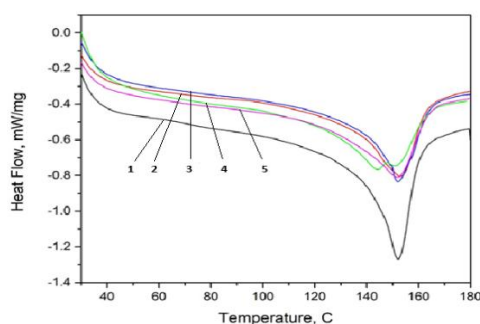


Fig. 4.9. Variația fluxului de căldură în funcție de temperatură în timpul încălzirii pentru toate probele: 1-material de bază; 2-hexagonal (4x); 3-patru (4x); 4-hexagonal (6x); 5-patru (6x)

În intervalul de temperatură cuprins între RT (temperatură camerei) și 130° C, materialul de bază și probele 4x și 6x au fost stabile termic. Pentru toate probele, minimul endotermic de pe graficele DSC înregistrat în timpul încălzirii a fost asociat cu procesul de topire, [100]. Temperatura de început a topirii, T_s ; temperatura la care 50% din probă s-a topit, T_{50} ; temperatura de sfârșit a topirii, T_f ; precum și cantitatea de căldură absorbită sunt prezentate în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5. Rezumatul temperaturilor critice și al căldurilor absorbite pentru procesul de topire în conformitate cu graficul DSC din figura 4.9.

Mostră	T_s , [°C]	T_{50} , [°C]	T_f , [°C]	$\Delta H/m$, [kJ/kg]
Material de bază	148.7	151.0	159.2	-38.27
4x/ hexagonal	149.8	153.0	161.8	-37.4
4x/ pătrat	148.8	152.2	164.3	-33.35
6x/ hexagonal	132.2	154.4	165.7	-51.25
6x /pătrat	137.8	151.8	163.8	-52.28

4.3.6. Topografie

Analiza topografică a polimerului biodegradabil cu textură hexagonală

În cazul materialului Arbofill Fichte cu textură hexagonală obținut prin 4 treceri, cea mai mare distanță dintre cel mai mic și cel mai mare vârf (R_z) pentru cele trei secțiuni considerate este prezentată în figura 4.10. Figura 4.11 prezintă abaterea de planeitate în urma texturării, care, în conformitate cu ISO Flatness, este de 10,848 μm . Valorile rugozității R_a pentru cele trei linii de referință selectate sunt afișate în figura 4.12, iar acestea corespund doar suprafețelor hexagonale care au fost create fără a ține cont de distanța dintre hexagoane..

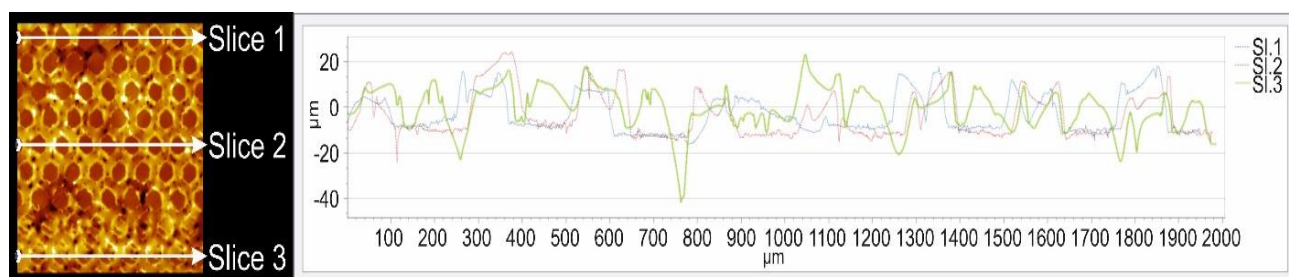


Fig. 4.10. Valoarea maximă R_z din analiza celor trei secțiuni - Arbofill Fichte: 4x_H, pe forma geometrică: Slice 1 (Sl.1); Slice 2 (Sl.2); Slice 3 (Sl.3)

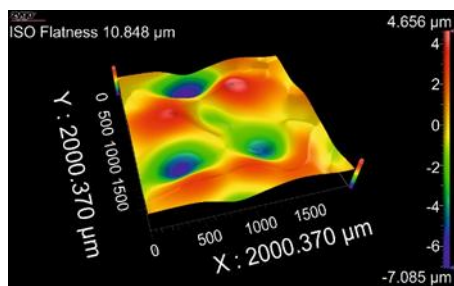


Fig. 4.11. Abaterea planeității după texturare - Arbofill Fichte: 4x_H

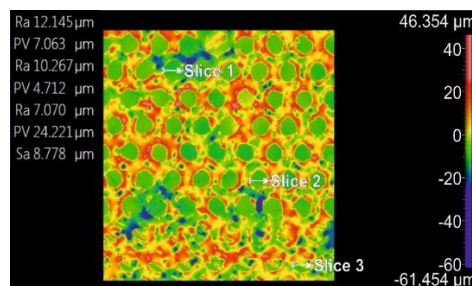


Fig. 4.12. Valoarea rugozității Ra pentru trei linii de referință - Arbofill Fichte: 4x_H, pe forma geometrică

În figura 4.13, sunt prezentate valorile interstițiilor pe axele X (lungime) și Y (adâncime) ale materialului prelucrat 4x.

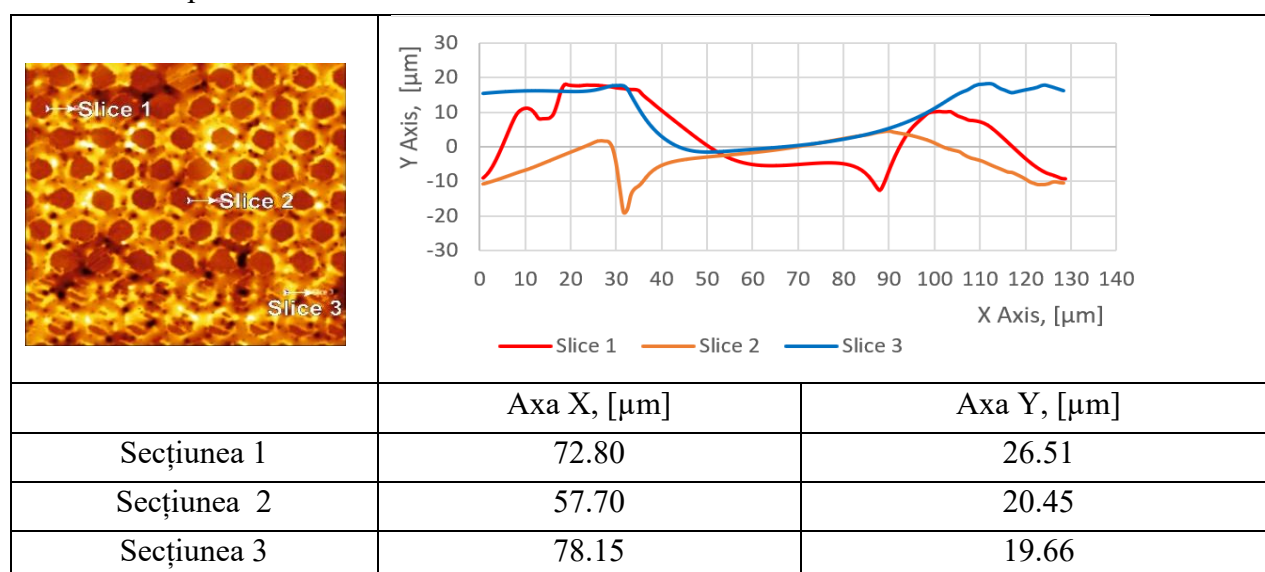


Fig. 4.13. Valoarea interstițiului pentru trei linii de referință - Arbofill Fichte: 4x_H, pe forma geometrică

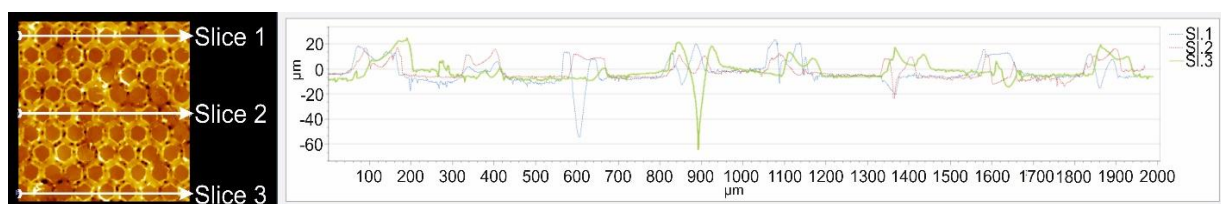


Fig. 4.14. Valoarea maximă Rz din analiza a trei secțiuni- Arbofill Fichte: 6x_H, pentru diferite forme geometrice: Secțiunea 1 (Sl.1); Secțiunea 2 (Sl.2); Secțiunea 3 (Sl.3).

În cazul texturii hexagonale obținute prin 6 treceri, este prezentată în figura 4.14, cea mai mare distanță dintre cel mai mic și cel mai mare vârf (Rz).

Abaterea de planeitate după texturare este prezentată în figura 4.15 cu o valoare de 7,828 μm conform ISO Flatness. În figura 4.16 sunt prezentate valorile rugozității Ra pentru cele trei linii de referință alese, care corespund doar suprafețelor hexagonale obținute fără a lua în considerare

distanța dintre hexagoane. Astfel, Sa obținut a avut valoarea de 7,175 μm , cu cea mai mare valoare $R_a=8,186 \mu\text{m}$ și $R_z=14,79 \mu\text{m}$ ambele în cazul secțiunii 2.

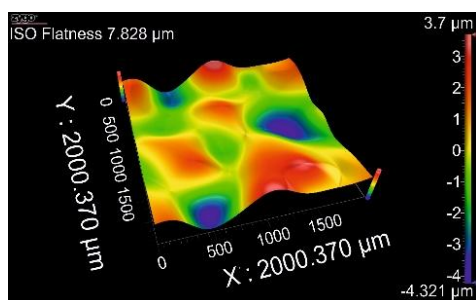


Fig. 4.15. Abaterea planeității după texturare -
Arbofill Fichte: 6x_H

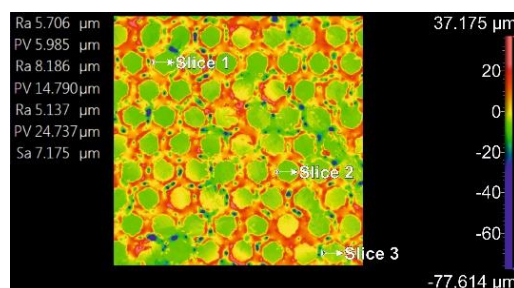


Fig. 4.16. Valoarea rugozității R_a pentru trei
linii de referință - Arbofill Fichte: 6x_H, pe
forma geometrică

În figurile 4.17, sunt prezentate valorile interstițiilor pe axele X (lungime) și Y (adâncime) ale materialului prelucrat 6x.

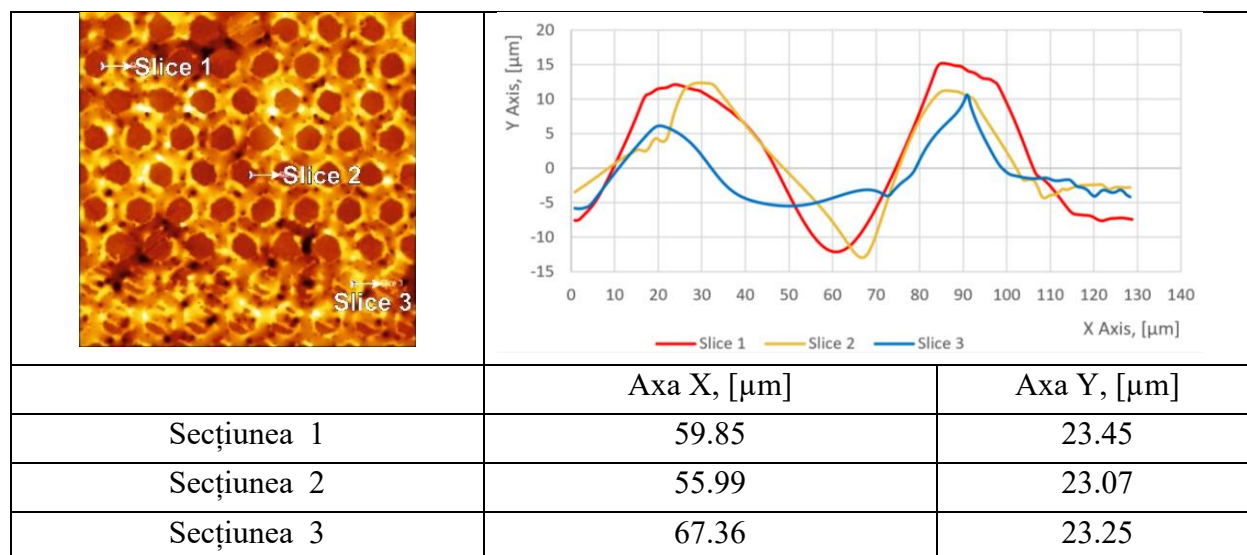


Fig. 4.17. Valoarea decalajului pentru trei linii de referință - Arbofill Fichte: 6x_H, pe forma
geometrică

CAPITOLUL V

CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND TEXTURAREA LASER A PIESELOR DIN BIOPOLIMERI- ARBOBLEND V2 NATURE

5.3. Rezultate și discuții

5.3.1. Observație microscopică

Morfologia suprafeței probelor după procesul de texturare cu laser este prezentată în figurile 5.1 - 5.2. Pentru toate probele testate, indiferent de tipul grupelor de materiale de bază, s-au observat modele de tip fagure de miere (grupa H) și microgăuri încrucișate (grupa S), care sunt caracteristici ale ablației fototermice.

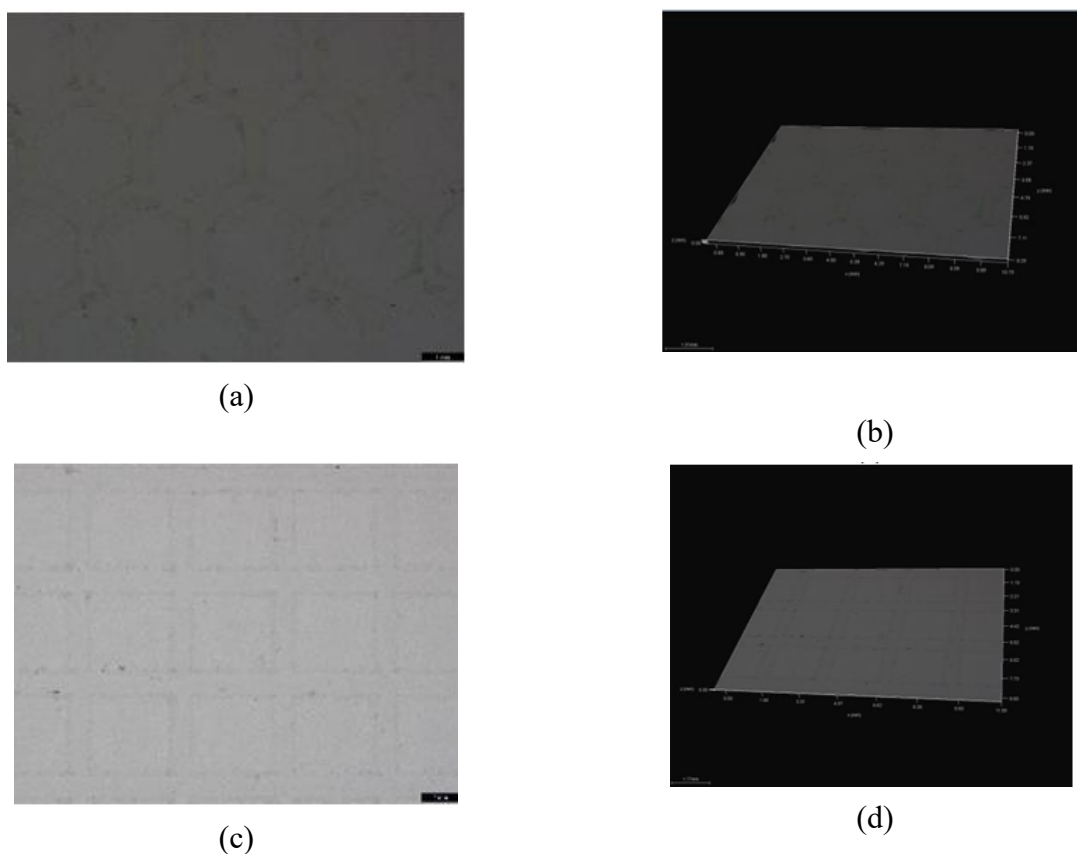


Fig. 5.1. Observarea microscopică a Arboblend V2 Nature după procesul de texturare cu laser: (a) și (b) 4x_H x300; (c) și (d) 4x_S x300.

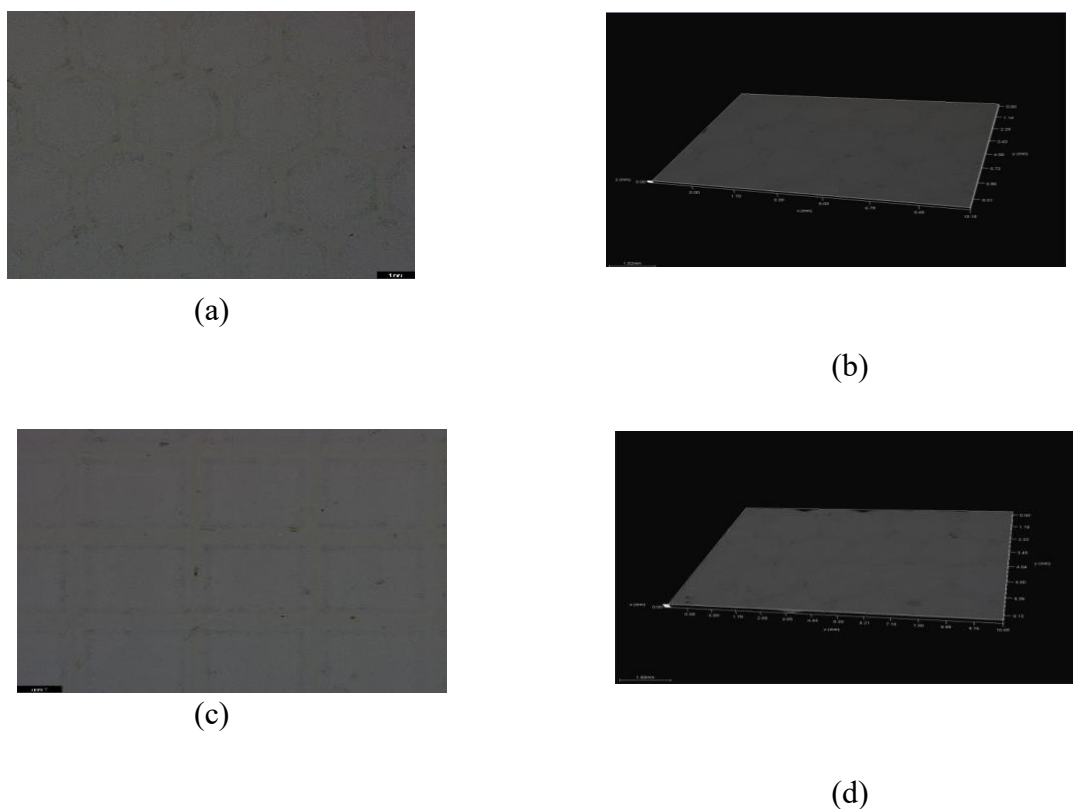


Fig. 5.2. Observarea microscopică a Arboblend V2 Nature după procesul de texturare cu laser: (a) și (b) 6x_H x300; (c) și (d) 6x_S x300

5.3.2. Test de umectabilitate

Pentru experimentul cu grupul de probe cu textură 6x și H (figura 5.4c, d), s-a înregistrat o scădere a unghiului de contact cu apa comparativ cu probele în stare inițială, iar valoarea medie a fost de $20 \pm 16^\circ$.

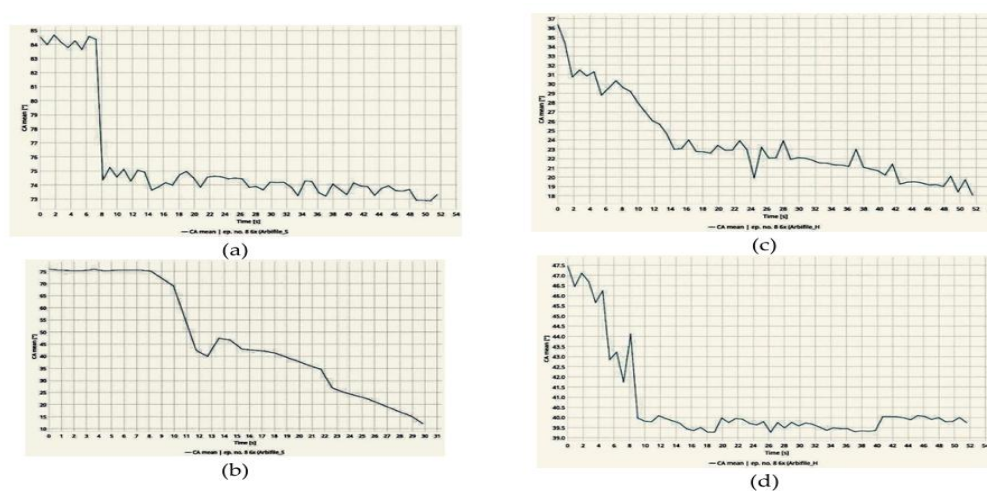


Fig. 5.4. Diagrama unghiului de contact pentru experimentul cu 6x (Arboblend V2 Nature): (a) și (b) S, (c) și (d) H

5.3.3. Test de uzură

Valoarea medie a coeficientului de frecare (COF) pentru grupul de probe Arboblend V2 Nature în starea inițială a fost de 0,25 (figura 5.5a). S-a constatat că texturarea cu laser folosind 4 treceri ale laserului, indiferent de modelul texturii, nu a afectat valoarea COF - valoarea medie a fost de 0,21 - 0,25. În plus, pentru acest grup de probe, COF a crescut inițial în timpul testului de rezistență la uzură de la 0,1 la 0,21 - 0,25, sugerând un comportament la uzură îmbunătățit inițial (figurile 5b și c). O creștere a numărului de treceri de la 4 la 6, indiferent de modelul texturii, a condus la o creștere a COF, cu o valoare medie apropiată de 0,31 (figurile 5.5d și e). Pe baza observației microscopice, s-a constatat că, pentru toate probele după procesul de texturare cu laser, modelul texturat nu a fost într-adevăr îndepărtat în timpul testului de uzură în condițiile propuse (figura 5.6).

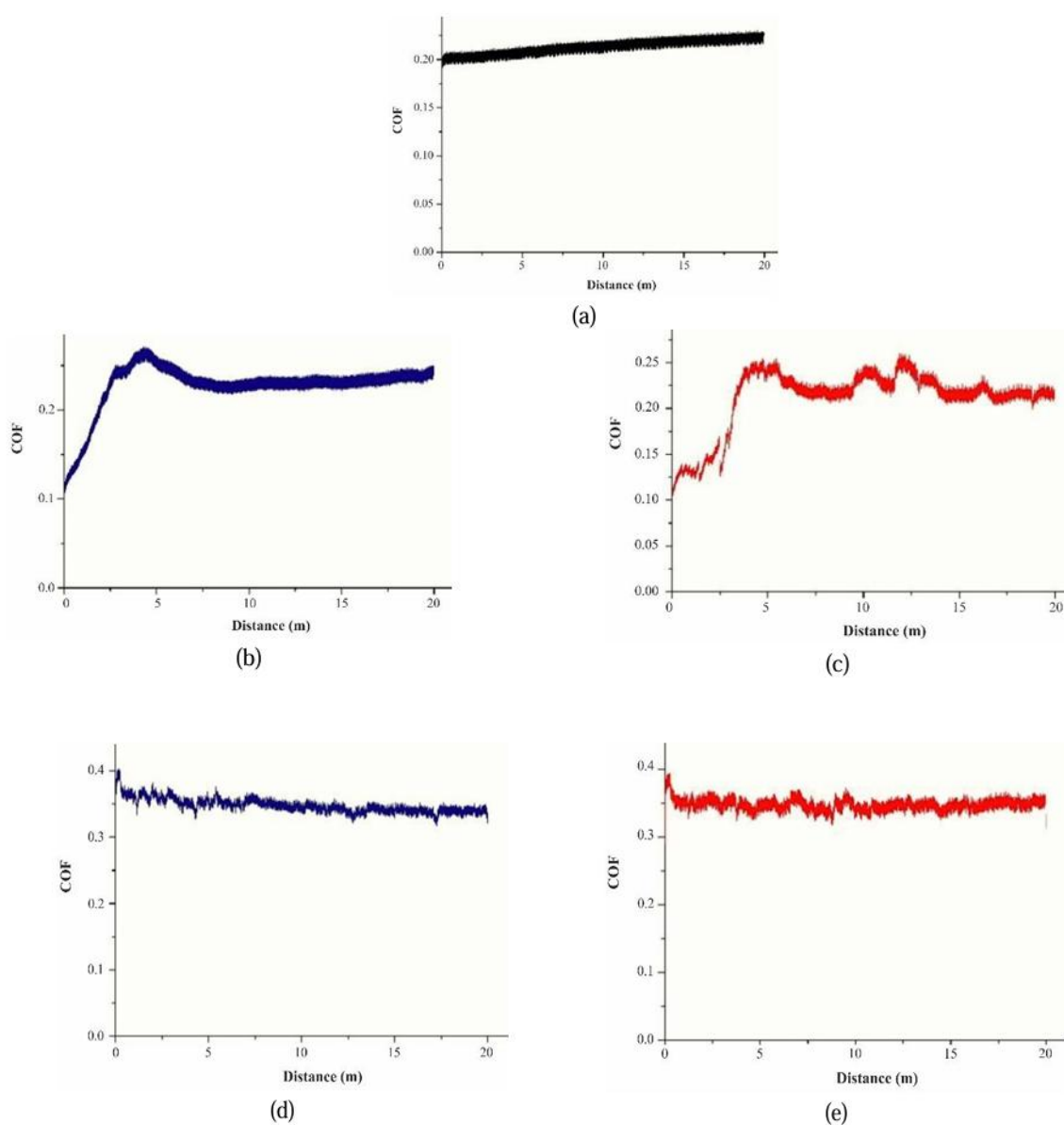
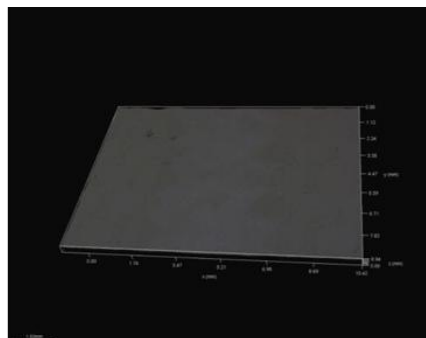


Fig. 5.5. Rezultatele testului COF pentru Arboblend V2 Nature: (a) material de bază; (b) 4x_H; (c) 4x_S; (d) 6x_H; (e) 6x_S



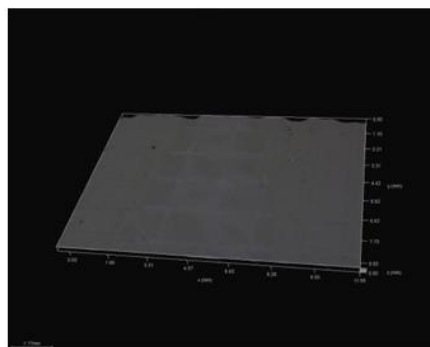
(a)



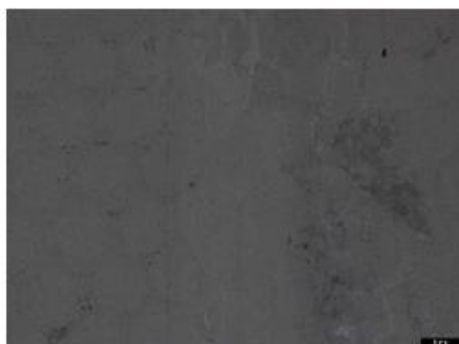
(b)



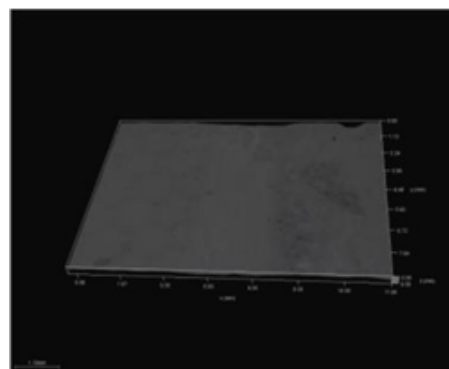
(c)



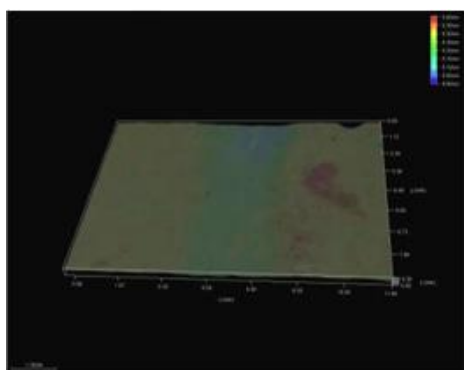
(d)



(e)



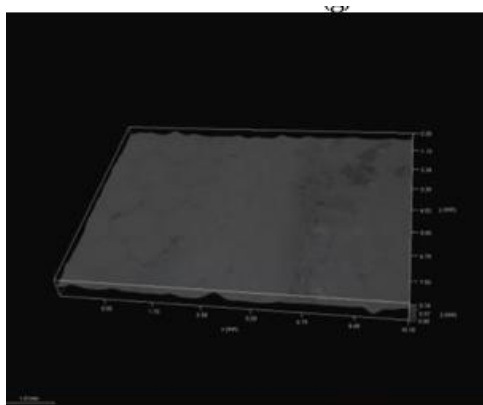
(f)



(g)



(h)



(i)

Fig. 5.6. Morfologia urmei de uzură a grupului de probe Arboblend V2 Nature: (a) și (b) 4x_H x200; (c) și (d) 4x_S x200; (e), (f) și (g) 6x_H x200; (h) și (i) 6x_S x200

5.3.4. Test de degradare

Pe baza rezultatelor obținute din măsurătorile de greutate înainte și după testul de degradare, s-a observat o creștere a greutatei pentru toate probele testate (tabelul 5.3). Cu toate acestea, pe baza observării microscopice a tuturor probelor după testul de degradare (figurile 5.7 – 5.9), nu au fost vizibile produse de degradare.

Tabelul 5.3. Rezultatele testului de degradare

Material		Greutate (g)		
		Înainte texturării	După texturare	Diferență
Arboblend V2 Nature	4 treceri de texturare	38.785	38.845	0.06
	6 treceri de texturare	37.840	37.903	0.063

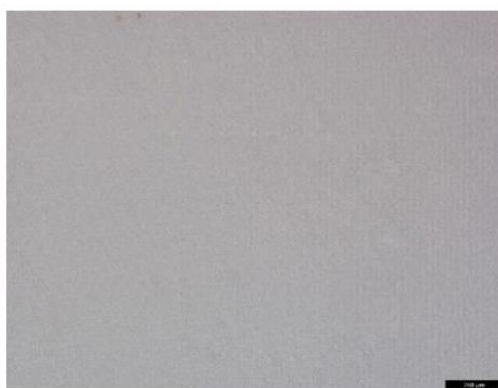


Fig. 5.7. Observarea microscopică a texturii laser Arboblend V2 Nature în starea inițială după testul de degradare

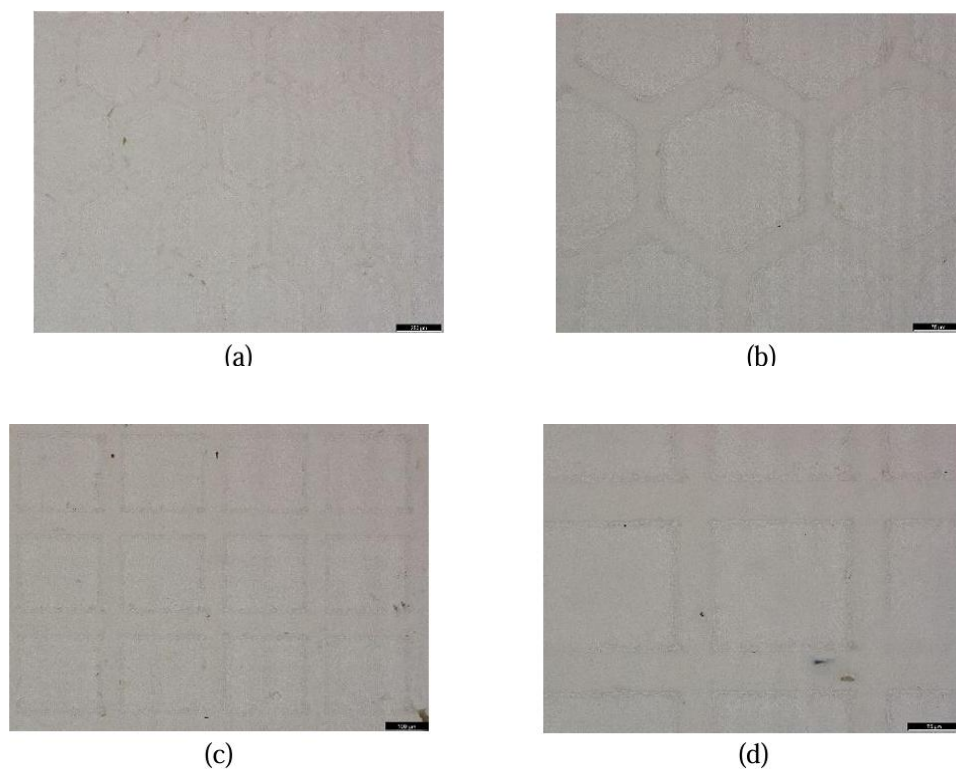


Fig. 5.8. Observarea microscopică a texturii laser Arboblend V2 Nature după testul de degradare: (a) și (b) 4x_H; (c) și (d) 4x_S

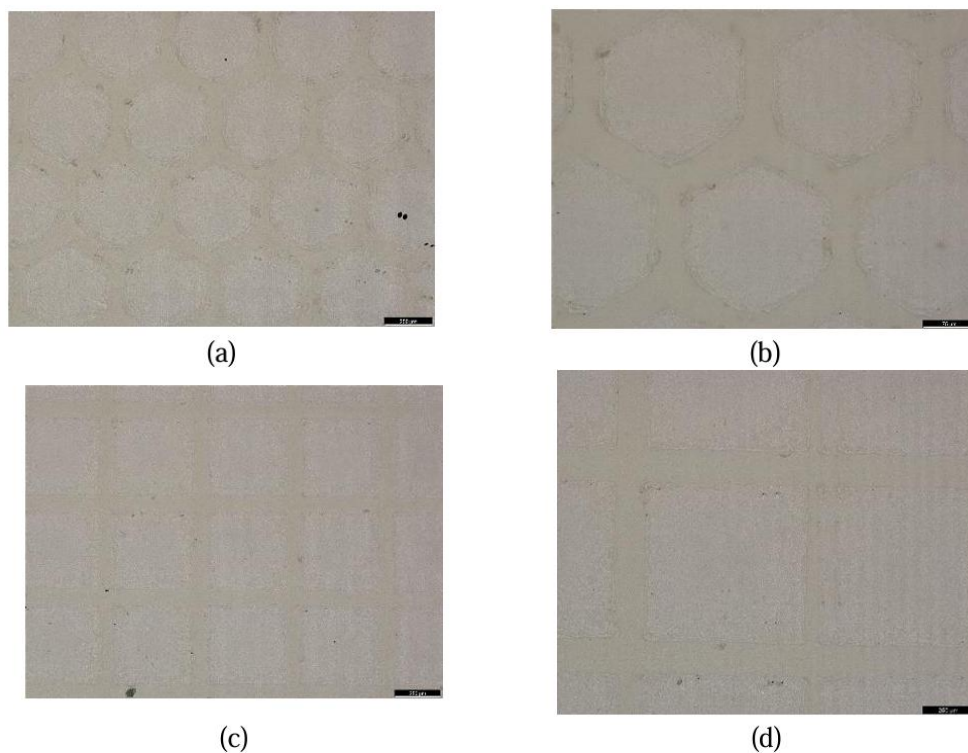


Fig. 5.9. Observarea microscopică a texturii laser Arboblend V2 Nature după testul de degradare: (a) și (b) 6x_H; (c) și (d) 6x_S

5.3.5. Topografie

Analiza topografică a materialului Arboblend V2 Nature cu textură hexagonală

În cazul materialului Arboblend V2 Nature cu textura hexagonală obținută prin 4 treceri (4x), în figura 5.10 este prezentată cea mai mare distanță dintre cel mai mic și cel mai mare vârf (PV_Peak și Valley) pentru cele trei secțiuni considerate.

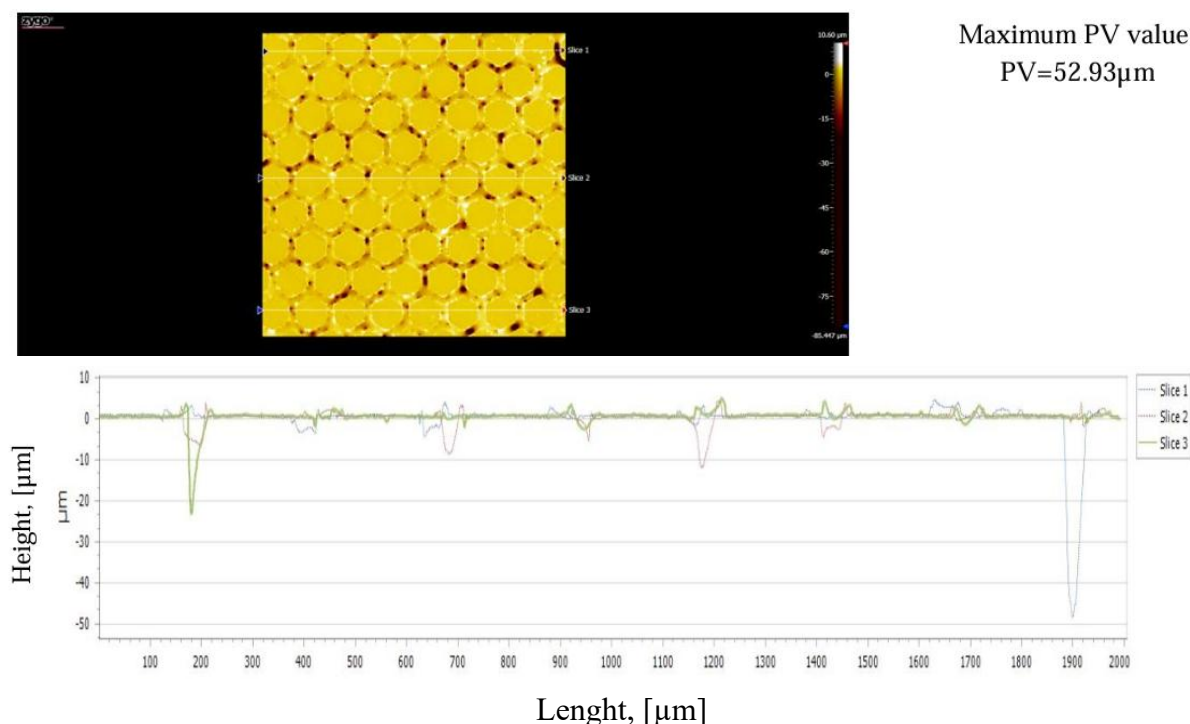


Fig. 5.10. Valoarea maximă PV din analiza celor trei secțiuni _ Arboblend V2 Nature: 4x_H

Abaterea planeității după texturare este prezentată în figura 5.11 cu o valoare de 0,962 μm conform ISO Flatness, iar figura 5.12 prezintă valorile rugozității Ra pentru cele trei linii de referință alese, care corespund numai suprafețelor hexagonale obținute fără a lua în considerare distanța dintre hexagoane.

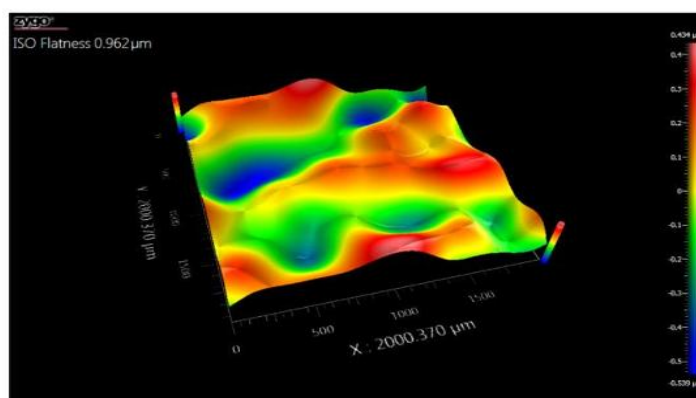


Fig. 5.11. Abaterea planeității după texturare - Arboblend V2 Nature: 4x_H

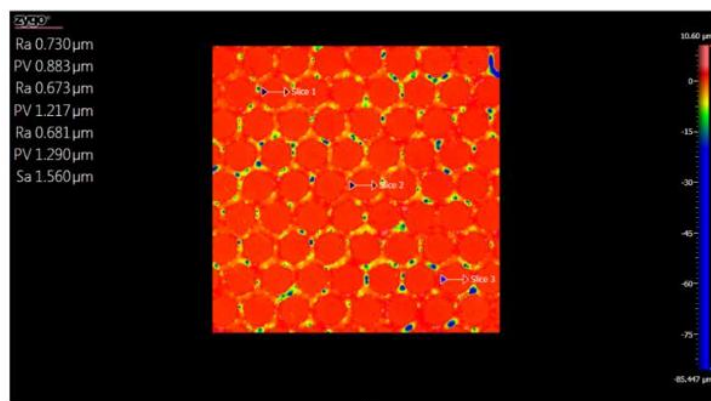
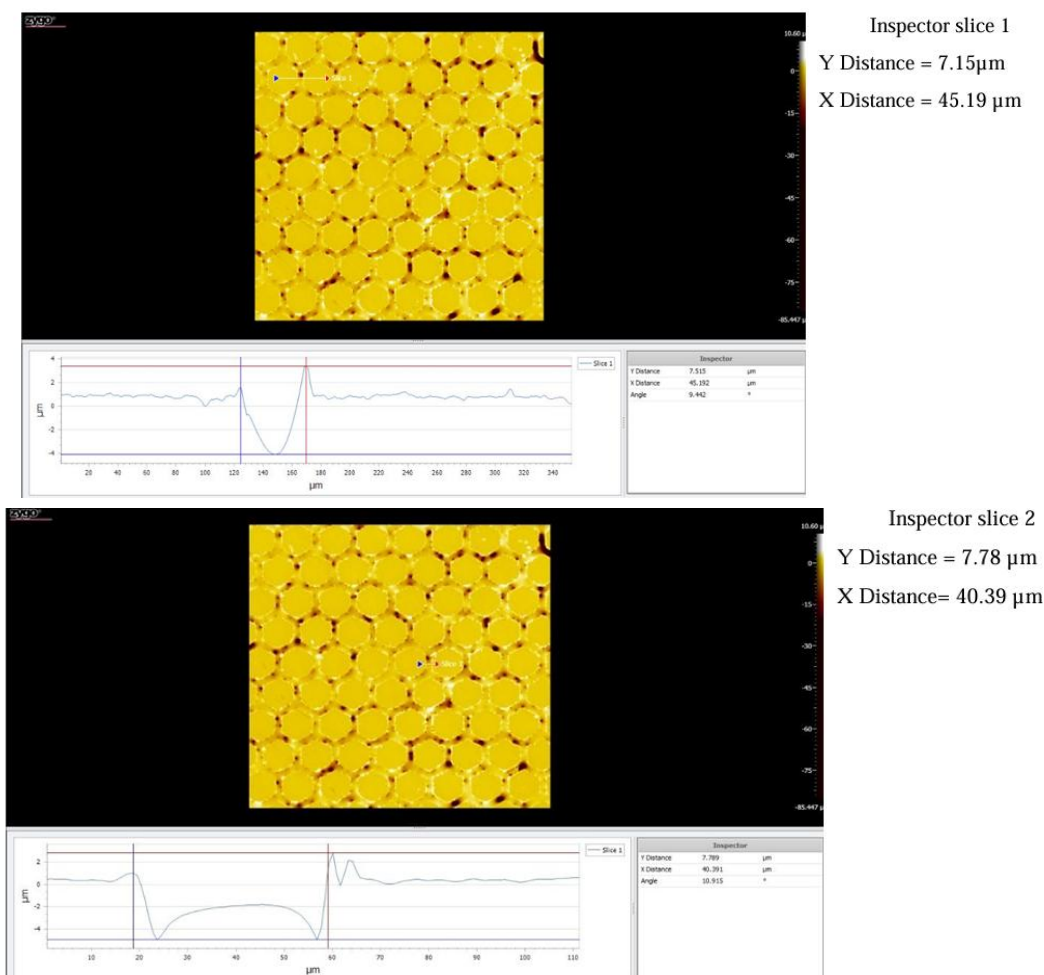


Fig. 5.12. Valoarea rugozității Ra pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 4x_H

Figura 5.13 prezintă trei seturi de date și grafice referitoare la geometrie și la distanțele măsurate pentru materialul Arboblend V2 Nature cu o structură de rețea hexagonală (similară unei structuri de tip fagure de miere).



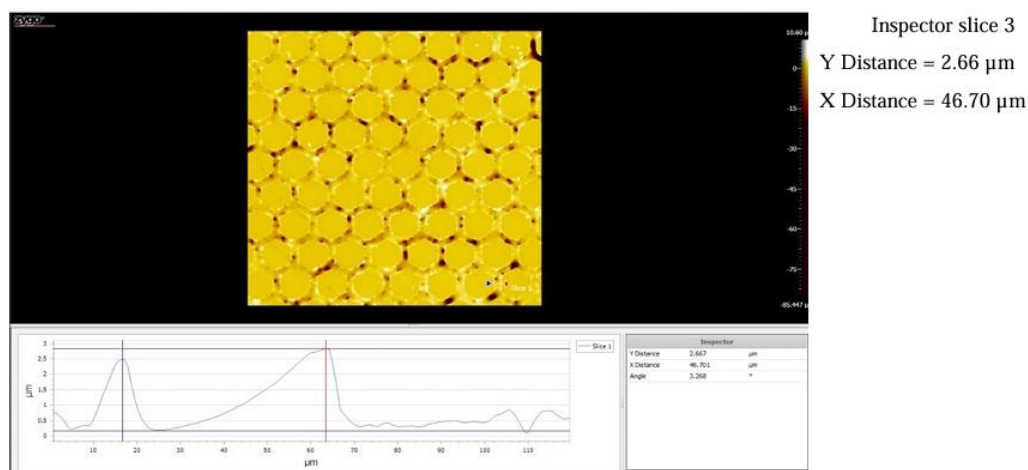


Fig. 5.13. Valoarea decalajului pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 4x_H

În cazul materialului Arboblend V2 Nature cu textură hexagonală obținută prin 6 treceri (6x), cea mai mare distanță dintre cel mai mic și cel mai mare vârf (PV_Peak to Valley) pentru cele trei secțiuni considerate este prezentată în figura 5.14, iar datele statistice corespunzătoare sunt prezentate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Date statistice pentru materialul Arboblend V2 Nature: 6x_H, în funcție de forma geometrică

Nr.crt.	Linia de referință	PV (μm)	RMS (μm)
1	Secțiunea 1	21.75	2.281
2	Secțiunea 2	13.41	1.553
3	Secțiunea 3	34.36	2.776
4	Medie	23.17	2.203
5	Abaterea standard	10.54	0.615
6	Gama	20.94	1.223
7	3 Sigma	31.64	1.846

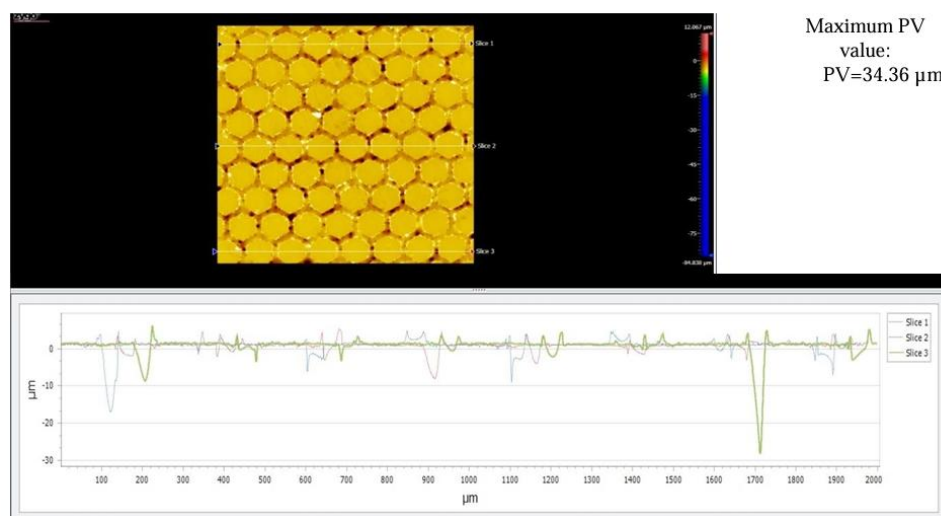


Fig. 5.14. Valoarea maximă a PV din analiza celor trei secțiuni - Arboblend V2 Nature: 6x_H

Abaterile de planeitate după texturare este prezentată în figura 5.15 cu o valoare de $0,961\ \mu\text{m}$ conform ISO Flatness, figura 5.16 prezintă valorile rugozității Ra pentru cele trei linii de referință alese, care corespund numai suprafețelor hexagonale obținute fără a lua în considerare distanța dintre hexagoane.

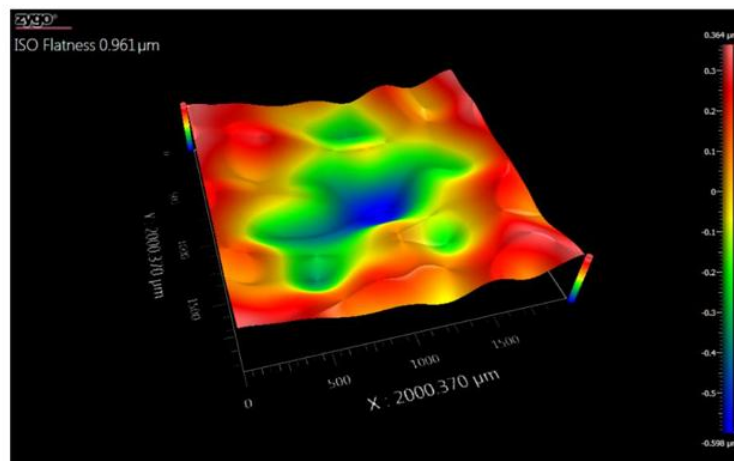


Fig. 5.15. Abaterile planeității după texturare - Arboblend V2 Nature: 6x_H

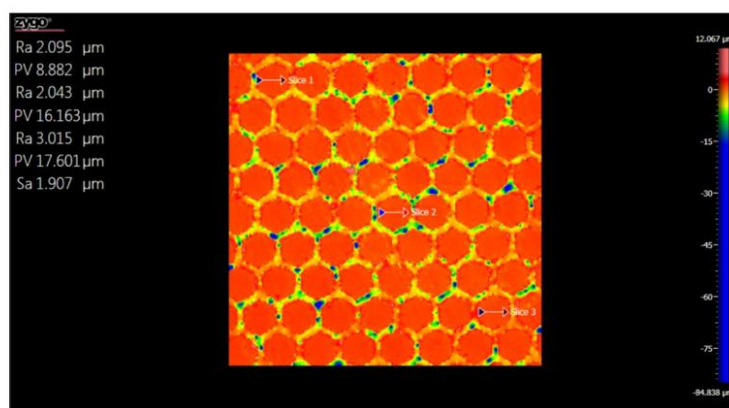
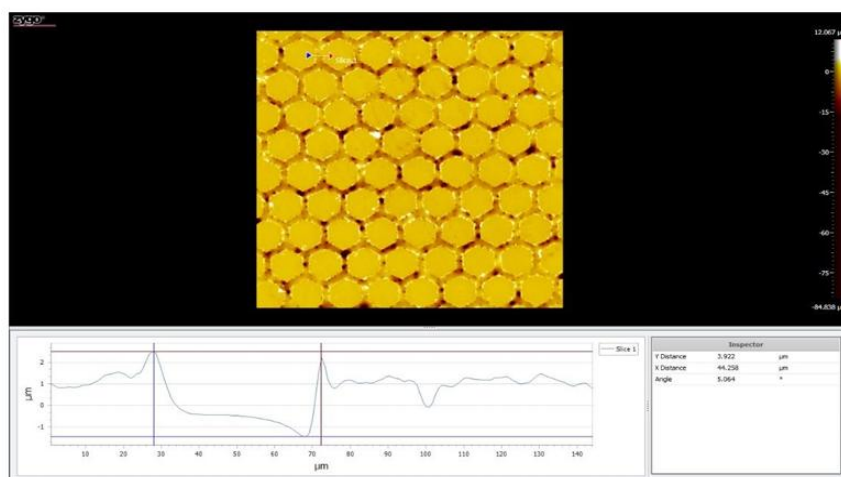


Fig. 5.16. Valoarea rugozității Ra pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 6x_H



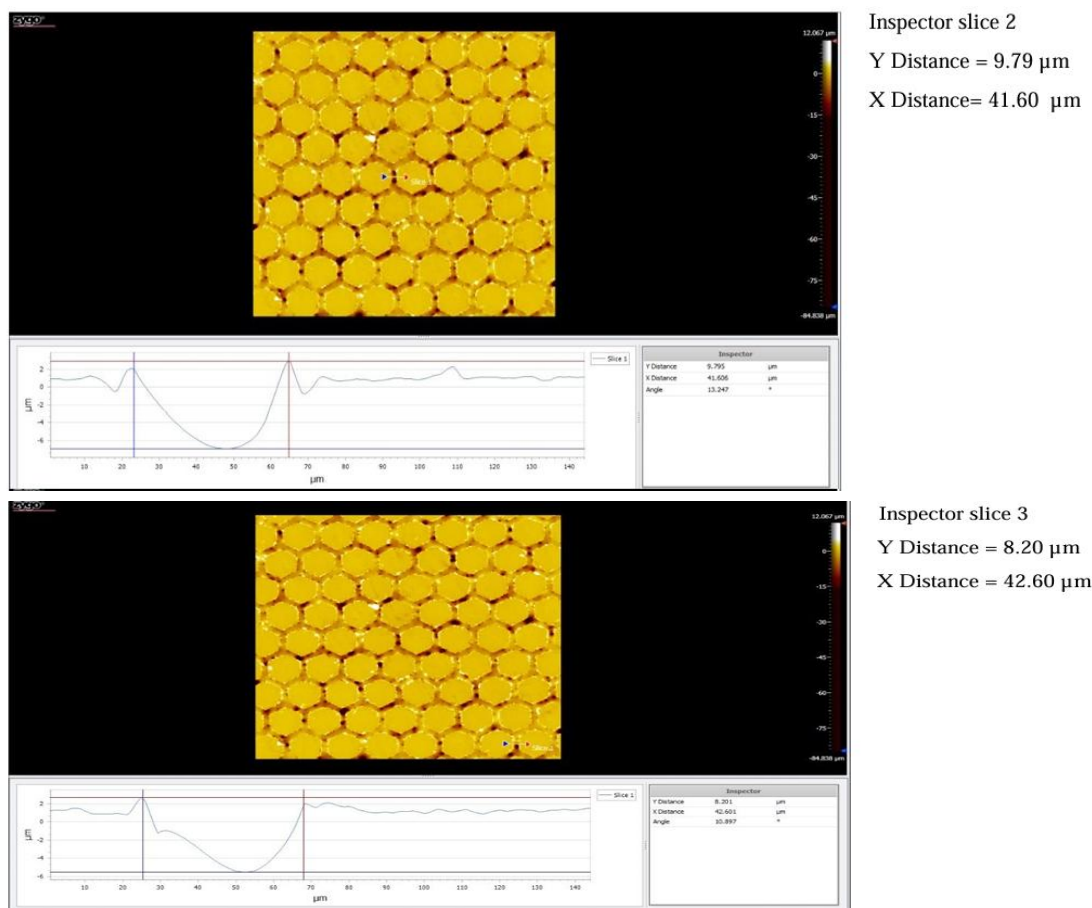


Fig. 5.17. Valoarea decalajului pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 6x_H

Analiza topografică a Arboblend V2 Nature cu textură pătrată

În cazul materialului Arboblend V2 Nature cu textură pătrată obținut prin 4 treceri, în figura 5.18 este prezentată cea mai mare distanță dintre cel mai mic și cel mai mare vârf (PV_Peak to Valley) pentru cele trei secțiuni considerate.

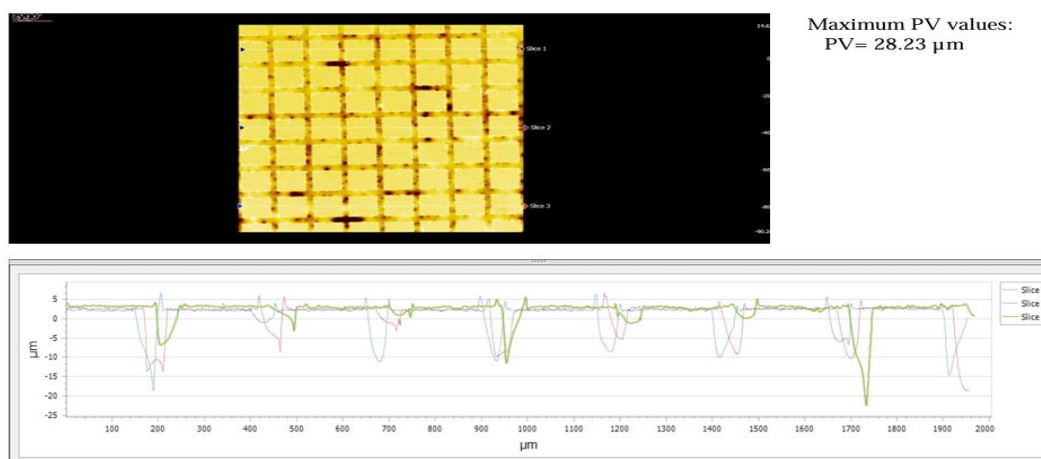


Fig. 5.18. Valoarea maximă PV din analiza celor trei secțiuni - Arboblend V2 Nature: 4x_S

Abaterea de planeitate după texturare este prezentată în figura 5.19 cu o valoare de 4,579 μm conform ISO Flatness. Figura 5.20 prezintă valorile rugozității Ra pentru cele trei linii de referință alese, care corespund numai suprafețelor pătrate obținute fără a lua în considerare distanța dintre acestea.

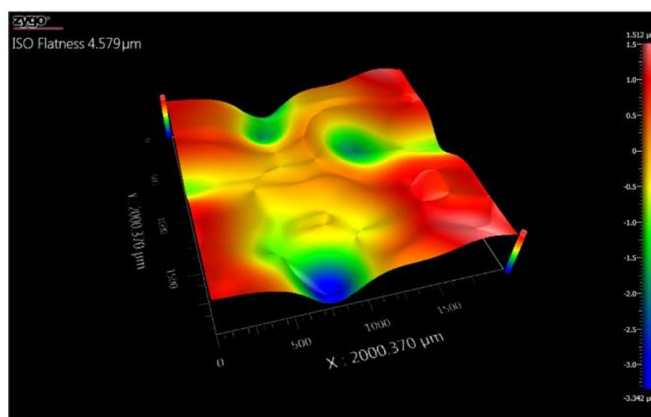


Fig. 5.19. Abaterea planeității după texturare - Arboblend V2 Nature: 4x_S

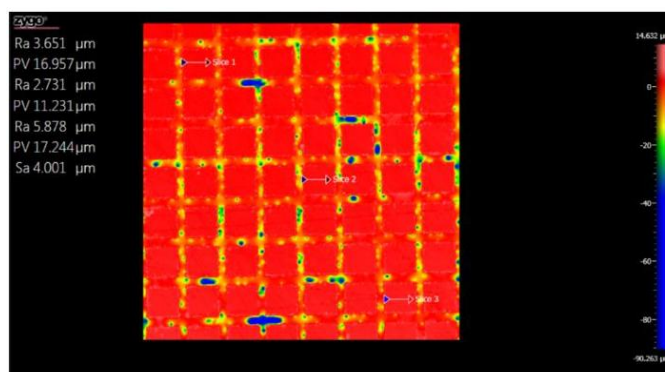
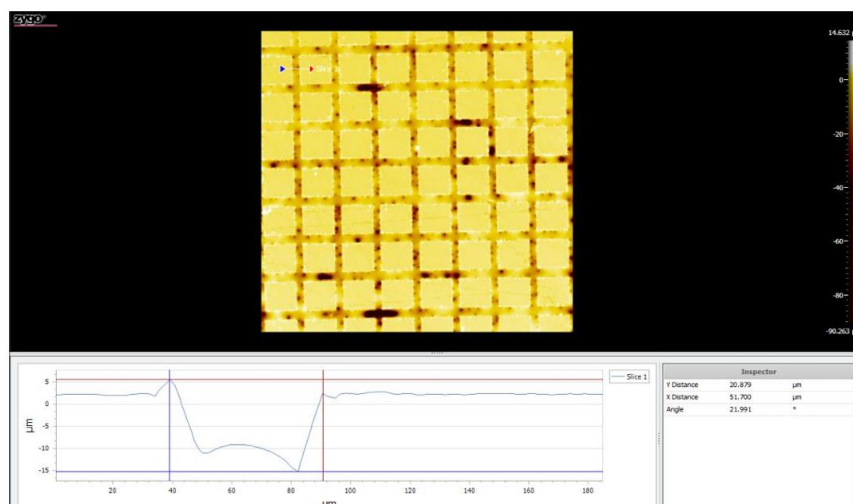


Fig. 5.20. Valoarea rugozității Ra pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 4x_S

Figura 5.21 prezintă trei seturi de date și grafice referitoare la geometria și distanțele măsurate pentru materialul Arboblend V2 Nature cu o structură de rețea pătrată.



Inspector slice 1
Y Distance = 20.87 μm
X Distance = 51.70 μm

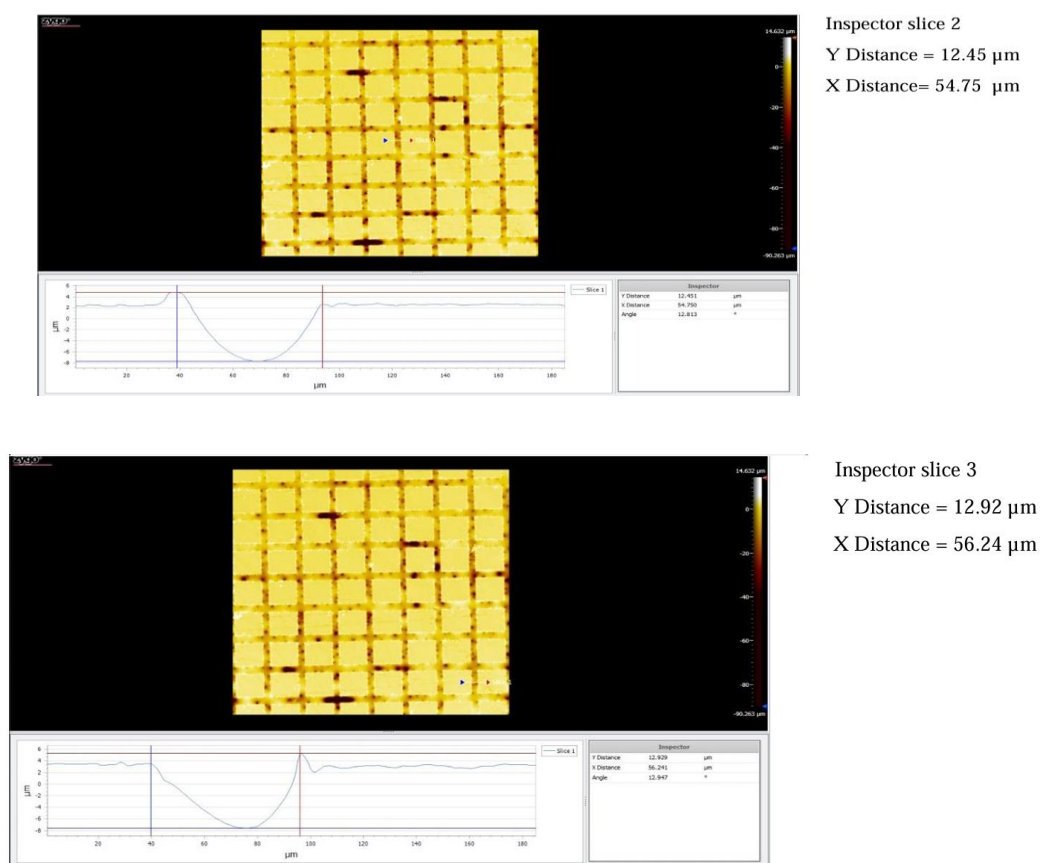


Fig. 5.21. Valoarea decalajului pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 4x_S

În cazul materialului Arboblend V2 Nature cu textură pătrată obținut prin 6 treceri, în figura 5.22 este prezentată cea mai mare distanță dintre vârful cel mai scăzut și cel mai ridicat (PV_Peak to Valley) pentru cele trei secțiuni luate în considerare, iar în tabelul 5.7 sunt prezentate datele statistice corespunzătoare.

Tabelul 5.7. Date statistice pentru materialul Arboblend V2 Natura: 6x_S

Nr.crt.	Linia de referință	PV (μm)	RMS (μm)
1	Secțiunea 1	26.56	2.812
2	Secțiunea 2	16.59	1.463
3	Secțiunea 3	22.27	2.326
4	Medie	21.81	2.200
5	Abaterea standard	5.00	0.683
6	Gama	9.97	1.349
7	3 Sigma	15.01	2.051

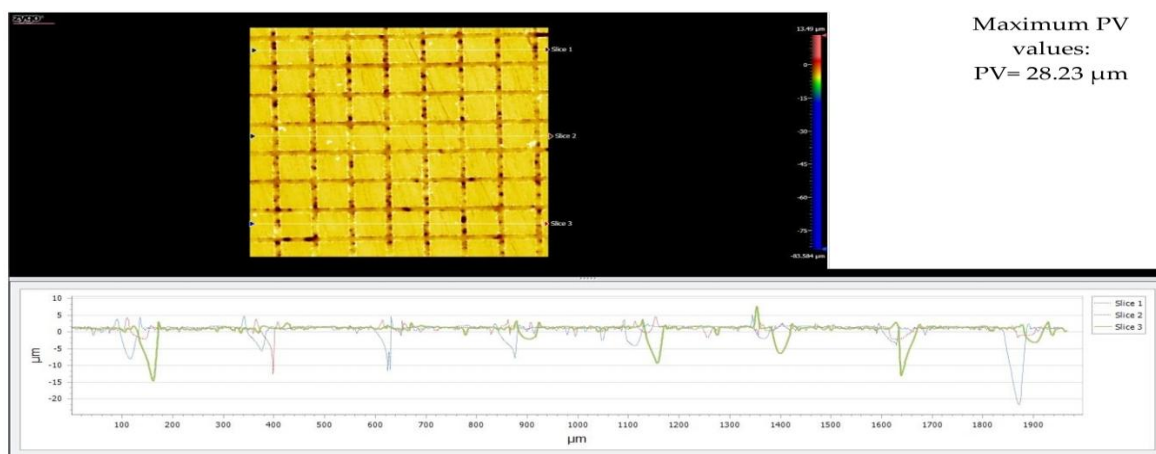


Fig. 5.22. PV maximă din analiza a trei secțiuni - Arboblend V2 Nature: 6x_S

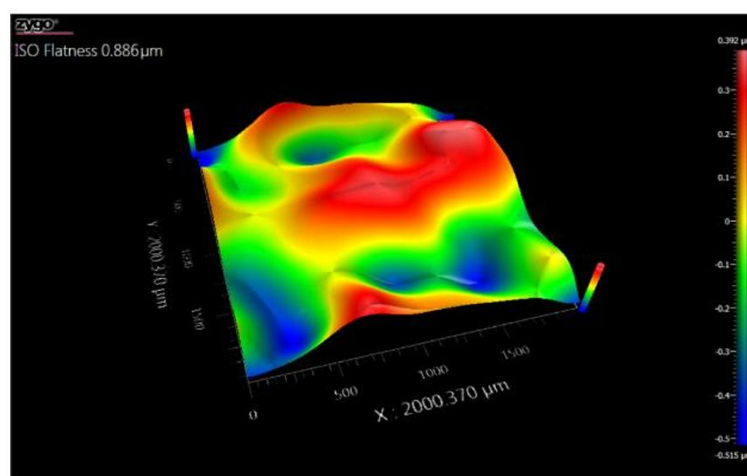


Fig. 5.23. Abaterea planeității după texturare - Arboblend V2 Nature: 6x_S

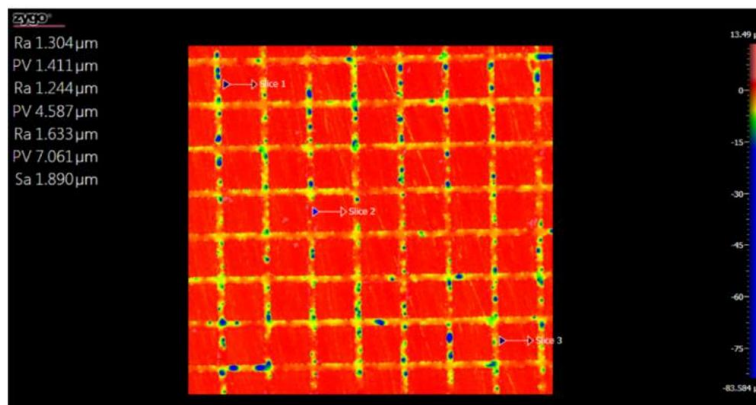


Fig. 5.24. Valoarea rugozității Ra pentru trei linii de referință - Arboblend V2 Nature: 6x_S, pe forma geometrică

CAPITOLUL VI

CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

6.1. Concluzii generale

Pe parcursul cercetărilor efectuate s-au utilizat echipamente, mașini și programe de măsurare performante și de actualitate, care au condus la obținerea de rezultate relevante și concludente. Trebuie menționat faptul că infrastructura de cercetare utilizată a fost din cadrul Universității Tehnice “Gheorghe Asachi” din Iași (Facultățile de Construcții de Mașini și Management Industrial, Facultatea de Mecanică) și Silesian University of Technology, Gliwice, Poland (Institute of Engineering Materials and Biomaterials).

Texturarea laser a suprafețelor biopolimerilor reprezintă o tehnologie avansată pentru îmbunătățirea caracteristicilor funcționale cu aplicabilitate în domenii medicale, auto și ambalajelor biodegradabile. Studiul realizat asupra materialului Arbofill Fichte, biopolimer biodegradabil, a evidențiat modificări semnificative ale proprietăților de suprafață prin aplicarea a patru (4x) și șase (6x) treceri de texturare, utilizând modele hexagonale și pătrate. Studiul a comparat efectele geometriei texturii (hexagonală vs. pătrată) și ale numărului de treceri (4x și 6x) asupra comportamentului de umectabilitate, tribologie, degradare și topografie.

Rezultatele testului de umectabilitate au arătat că texturarea cu 6 treceri a permis obținerea unor suprafețe superhidrofile (unghi de contact = 0° în doar 1 secundă pentru textura pătrată), ceea ce indică o creștere semnificativă a hidrofilicității prin modificarea rugozității și a energiei de suprafață. De asemenea, s-a identificat un comportament hidrofil pentru majoritatea probelor, cu valori ale unghiului de contact sub 90° , excepție făcând textura pătrată 4x, unde s-a observat o hidrofobizare (98°). Creșterea numărului de treceri a dus, în general, la o hidrofilicitate mai mare, cu o variație semnificativă în cazul texturii hexagonale 6x ($20^\circ \pm 16^\circ$).

Testele tribologice au demonstrat creșterea coeficientului de frecare (COF), mai accentuată pentru textura pătrată (până la 0.51) comparativ cu textura hexagonală (0.26), sugerând un impact diferențiat în funcție de geometrie. Texturarea cu 4 treceri nu a afectat semnificativ coeficientul de frecare (COF), dar la 6 treceri, COF a crescut până la o medie de 0,31, semnalând o rugozitate crescută și o interacțiune mai puternică cu contraprobele.

Analiza topografică a relevat o stabilitate geometrică mai ridicată în cazul texturilor hexagonale, cu variații minime de-a lungul axei X și o compresie relativ uniformă pe axa Y. În schimb, textura pătrată a prezentat o variabilitate mai mare atât în extindere, cât și în comprimare, în special la 6 treceri, indicând o sensibilitate crescută la numărul de impulsuri laser.

În concluzie, geometria hexagonală realizată prin 6 treceri, asigură o structură mai stabilă și mai uniformă, fiind recomandabilă pentru aplicații unde geometria influențează semnificativ comportamentul în funcționare al suprafețelor. Pe de altă parte, geometria pătrată a texturii este mai sensibilă la variații ale adâncimii texturii obținute, ceea ce permite realizarea de adâncimi mai mari ale texturii cu creșterea numărului de treceri.

6.2. Contribuții originale

Având în vedere rezultatele obținute pe parcursul elaborării tezei de doctorat, contribuțiile personale sunt, după cum urmează:

- realizarea unei fundamentări științifice asupra procesului de LST aplicat pe biopolimeri, cu analiza detaliată a influenței parametrilor tehnologici asupra caracteristicilor de suprafață;
- obținerea probelor din Arboblend V2 Nature și Arbofill Fichte, folosind două geometrii de textură (hexagonală și pătrată) prin 4 și 6 treceri ale razei laser;
- caracterizarea morfologică a suprafețelor după texturare prin microscopie optică și microscopie electronică de baleiaj (SEM);
- realizarea analizei topografice a suprafețelor texturate, prin profiluri de adâncime și măsurători de rugozitate Ra;
- determinarea unghiului de contact la intervale succesive de timp pentru evaluarea umectabilității suprafețelor în funcție de parametrii texturii și de timpul de contact cu lichidul;
- determinarea coeficientului de frecare (COF) pentru ambele materiale, analizând influența tipului de textură asupra comportamentului tribologic;
- realizarea testelor de degradare accelerată în medii umede/ corozive, cu măsurarea pierderilor de masă și observarea modificărilor de suprafață prin imagini SEM;
- aplicarea metodei DSC (calorimetrie diferențială de scanare) pentru determinarea temperaturii de tranziție vitroasă (Tg) și identificarea eventualelor modificări induse termic prin texturare laser.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Cunoașterea prelucrabilității materialelor biodegradabile este un pas important în analiza și stabilirea posibilităților de înlocuire a materialelor plastice.

În urma cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat intitulată “*Contribuții privind texturarea laser a pieselor din materiale biodegradabile obținute prin injectare*” se pot evidenția următoarele direcții viitoare de cercetare:

- ✓ Extinderea texturării asupra altor biopolimeri (de exemplu, PLA, Green TEC, bioFila) și studiul acestora pentru realizarea unei baze comparative solide între diferite materiale ecologice;
- ✓ Optimizarea parametrilor laser (putere, frecvență, viteză de scanare) în funcție de fiecare biopolimer în parte, pentru realizarea unei texturi funcționale;
- ✓ Investigarea influenței texturării asupra aderenței bacteriene și a biocompatibilității în vederea extinderii aplicabilității în domeniul biomedical;

- ✓ Aplicarea suprafețelor texturate pe componente funcționale (dispozitive medicale, piese auto, ambalaje) și testarea funcționalității acestora;
- ✓ Realizarea de teste de rezistență la oboseală a pieselor pentru a extinde utilizarea acestora și în alte domenii industriale;
- ✓ Evaluarea comportamentului în medii agresive (salinitate, radiații UV, medii corozive) pentru determinarea stabilității pe termen lung.

LISTA LUCRĂRILOR ȘTIINȚIFICE

- 1). Ciprian-Dumitru Ciofu, **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Marcin Adamiak, Oktawian Bialas, Catalin Tampu, Panagiotis Kyratsis, Anastasios Tzotzis, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Alexandra Nedelcu, Zhengyi Jiang, Daniel Mindru, Dumitru Nedelcu, (2025), *Wettability, Tribology, Degradation, and Topography of Laser-Textured Surfaces of Biopolymers*, Micromachines 2025, 16, 1009, <https://doi.org/10.3390/mi16091009>
- 2). **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Oktawian Bialas, Anna Wozniak, Augustine Appiah, Catalin Tampu, Marcin Adamiak, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Panagiotis Kyratsis, Anastasios Tzotzis, Alexandra Nedelcu, Teodor-Daniel Mindru, Dumitru Nedelcu, (2025), *Characterization of Laser-Textured Surfaces of Parts of a Biodegradable Polymer*, Coatings 15(2), 246, <https://doi.org/10.3390/coatings15020246>
- 3). **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Catalin Tampu, Constantin Carausu, Ciprian Dumitru Ciofu, Dumitru Nedelcu, (2025), *Laser surface texturing of biodegradable polymers*, Macromol. Symp. 2025, 414, 70053, <https://doi.org/10.1002/masy.70053>
- 4). **Petronela- Daniela Rusu (Ostahie)**, (2025), *Characterization Of Laser-Textured Surfaces – A Review*, Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, vol. 71(75), issue 2, 9-28.
- 5). Simona-Nicoleta Mazurchevici, Oktawian Bialas, Anna Wozniak, Marcelin Benchea, **Petronela Rusu (Ostahie)**, Ciprian Ciofu, Daniel- Teodor Mindru, Marcin Adamiak, Dumitru Nedelcu (2024), *Advances of laser surface texturing on the polyamide parts*, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, XVI(3), <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2024.16.3.174>
- 6). Simona-Nicoleta Mazurchevici, Oktawian Bialas, Anna Wozniak, Marcelin Benchea, **Petronela Rusu (Ostahie)**, Ciprian Ciofu, Constantin Carausu, Marcin Adamiak, Dumitru Nedelcu, (2024), *Modifying surface characteristics of polyamide 6.6 by using LST technique*, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, XVI(2), <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2024.16.2.113>
- 7). **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Catalin Tampu, Constantin Carausu, Ciprian Dumitru Ciofu, Dumitru Nedelcu, (2025), *Laser surface texturing of biodegradable polymers*, lucrare prezentată la Conferința Internațională POLCOM 2024, 20-23 noiembrie 2024, București, Romania, Conferință WoS.
- 8). **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Teodor Daniel Mindru, Ciprian Dumitru Ciofu, Dumitru Nedelcu, (2024), *Effect of LST process on material surface characteristics: A review*, lucrare prezentată la Conferința Internațională ModTech2024, 24-27 iunie 2024, Putrajaya, Kuala Lumpur, Malaysia, Conferință BDI-Scopus.
- 9). **Petronela-Daniela Rusu (Ostahie)**, Marcin Adamiak, Oktawian Bialas, Catalin Tampu, Panagiotis Kyratsis, Anastasios Tzotzis, Simona-Nicoleta Mazurchevici, Alexandra Nedelcu, Zhengyi Jiang, Dumitru Nedelcu, (2025) *Injection molded parts from biodegradable materials with laser surfaces textured*, lucrare prezentată la Conferința Internațională ModTech2025, 11-14 iunie 2025, Zakopane, Poland, Conferință BDI-Scopus.
- 10). **Petronela Rusu (Ostahie)**, (2025), *Characterization of laser-textured surfaces – a review*, Conferința Scolii doctorale TUIASI, 14-16 mai, 2025, Iași, Romania.

REFERINȚE

- [2] Moldovan, E., Tiorean, M. H., & Stanciu, E. M. (2017). Overview of joining dissimilar materials: Metals and polymers. *B. Transilvania University*, 10(1), 39–46.
- [5] Moldovan, E. R., Stanciu, E. M., Rusu, C., & Gheorghe, D. (2022). Morphological analysis of laser surface texturing effect on AISI 430 stainless steel. *Materials*, 15(10), 4580. <https://doi.org/10.3390/ma15104580>
- [9] Cui, X., Li, X., Wu, D., & Wang, H. (2021). Effects of bio-inspired integration of laser-induced microstructure and coated cemented carbide on tool performance in green intermittent turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.041>
- [11] Guimarães, B., Fernandes, C. M., Figueiredo, D., Carvalho, O., Silva, F. S., & Miranda, G. (2020). Effect of laser surface texturing on the wettability of WC-Co cutting tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 1991–1999. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05674-0>
- [14] Ocaña, J. L., Huerta-Murillo, D., Lasagni, A. F., Aguilar-Morales, I., Alamri, S., Cardoso, J. T., García-Beltrán, A., Cordovilla, F., & Angulo, I. (2020). Modification of Ti6Al4V surface properties by combined DLW-DLIP hierarchical micro-nano structuring. *Advanced Optical Technologies*, 9(3), 121–130. <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0071>
- [17] Sun, L., Guo, J., Chen, H., Zhang, D., Shang, L., Zhang, B., & Zhang, Y. (2021). Tailoring materials with specific wettability in biomedical engineering. *Advanced Science*, 8(12), 2100126. <https://doi.org/10.1002/advs.202100126>
- [18] Rupasov, A. E., Danilov, P. A., & Kudryashov, S. I. (2020). Femtosecond-laser microstructuring in transparent materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1692, 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1692/1/012011>
- [19] Samoila, C., Ursutiu, D., & Tavkhelidze, A. (2020). Nanograting layers of Si. *Nanotechnology*, 31(3), 035301. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab4889>
- [20] Hu, G., Zhang, L., & Zhang, H. (2018). Engineered functional surfaces by laser microprocessing
- [23] Salstela, J., Suvanto, M., & Pakkanen, T. T. (2016). Influence of hierarchical micro-micro patterning and chemical modifications on adhesion between aluminum and epoxy. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 66, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.04.004>
- [24] Moldovan, E. (2022). Contribution to the laser surface texturing of AISI 430 stainless steel (Doctoral dissertation). Transilvania University, Brașov
- [26] Rupasov, A. E., Danilov, P. A., & Kudryashov, S. I. (2020). Femtosecond-laser microstructuring in transparent materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1692, 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1692/1/012011>
- [30] Liang, Y., & Zhao, J. (2017). Honeybees have hydrophobic wings that enable them to fly through fog and dew. *Journal of Bionic Engineering*, 14(3), 549–556. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(16\)60478-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60478-8)
- [32] Liu, W., Liu, S., & Wang, L. (2019). Surface modification of biomedical titanium alloy: Micromorphology, microstructure evolution, and biomedical applications. *Coatings*, 9(4), 249. <https://doi.org/10.3390/coatings9040249>

- [35] Mitra, S., & Gupta, V. (2021). Tribological performance of laser-textured polymer surfaces. *Wear*, 482–483, 203975. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203975>.
- [36] Tiwari, M., Kumar, R., Jha, R. K., & Singh, A. (2020). Laser texturing of biopolymers for enhanced biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 111, 110805. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110805>
- [37] Garcia, M., Rossi, F., Conti, M., & De Angelis, M. (2022). The role of laser texturing on the biocompatibility of polymers. *Biomedical Materials*, 17(4), 045012. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ac6162>.
- [43] Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (2000). Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterials*, 21(23), 2335–2346. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00101-4).
- [48] Glowacki, J., & Mizuno, S. (2008). Collagen scaffolds for tissue engineering. *Biopolymers*, 89(5), 338–344. <https://doi.org/10.1002/bip.20833>.
- [52] Gómez-Guillén, M. C., Giménez, B., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2011). Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1813–1827. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.014>.
- [55] Kalinowski, A., Radek, N., Orman, Ł., Pietraszek, J., Szczepaniak, M., & Bronček, J. (2023). Laser surface texturing: Characteristics and applications. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*, 5(1), 240–248. <https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0026>.
- [59] Tofil, S., Kurp, P., & Manikandan, M. (2023). Surface laser micropatterning of polyethylene (PE) to increase the shearing strength of adhesive joints. *Lubricants*, 11(9), 368. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090368>.
- [62] Zhang, T., Wang, Z., & Liu, J. (2023). Effect of laser parameters on surface texture of polyformaldehyde and parameter optimization using Grey-Taguchi. *Journal of Manufacturing Processes*, 86, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.012>.
- [69] R.J. Young, P.A. Lovell, "Introduction to Polymers", 3rd ed., CRC Press, 2011.
- [73] Li, X., Tang, R., Li, D., Li, F., Chen, L., Zhu, D., Feng, G., Zhang, K., & Han, B. (2024). Investigations of the laser ablation mechanism of PMMA microchannels using single-pass and multi-pass laser scans. *Polymers*, 16(2361). <https://doi.org/10.3390/polym16162361>.
- [78] Choi, S. J., et al. (2021). Creating lotus effect on polymer surfaces by laser texturing. *Journal of Materials Science*, 56(2), 786–797. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05158-2>.
- [81] Hatem, A. A., Rasheed, B. G., & Ahmed, N. M. (2024). Laser produced hydrophilic and hydrophobic silicon surfaces. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 27(1), 54–60. <https://doi.org/10.29194/NJES.27010054>.
- [84] Oxford Lasers Ltd. (2013). A-355ps: Operation manual [Internal technical manual, confidential, unpublished]. Silesian University of Technology.
- [85] <https://www.utoledo.edu/engineering/cmssc/instruments/quanta200.html>- accesat la data de 06.06.2024.
- [91] Mazurchevici, S.-N., Vaideanu, D., Rapp, D., Varganici, C.-D., Cărașu, C., Boca, M., & Nedelcu, D. (2021). Dynamic mechanical analysis and thermal expansion of lignin-based biopolymers. *Polymers*, 13(9), 2953. <https://doi.org/10.3390/polym13172953>
- [92] Nedelcu, D. (2013). Investigation on microstructure and mechanical properties of samples obtained by injection from Arbofill. *Composites Part B: Engineering*, 47, 126–129. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.023>

- [93] Nedelcu, D., Ciofu, C., & Lohan, N. M. (2013). Microindentation and differential scanning calorimetry of "liquid wood". *Composites Part B: Engineering*, 55, 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.007>
- [96] Nedelcu, D., Plavanescu, S., & Puiu, E. (2014). Impact resistance of "liquid wood." *Advanced Materials Research*, 1036, 13–17. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.13>
- [97] Broitman, E., Nedelcu, D., Mazurchevici, S., Glenat, H., & Grillo, S. (2019). Tribological and nanomechanical behavior of liquid wood. *Journal of Tribology*, 141(2), 022001. <https://doi.org/10.1115/1.4041074>
- [101] Šugár, P., Šugárová, J., & Frnčík, M. (2016). Laser texturing of steel surfaces for tools: Evaluation of textured surface quality. *Open Engineering*, 6, 90–97. <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0010>.
- [102] Tripathi, K., Gyawali, G., Joshi, B., Amanov, A., & Wohn, S. (2017). Improvement of tribological behavior of grey cast iron under low and high viscosity lubricants by laser surface texturing. *Materials Performance and Characterization*, 6, 24–41. <https://doi.org/10.1520/MPC20160024>
- [105] Xing, Y., Deng, J., Feng, X., & Yu, S. (2013). Effect of laser surface texturing on the sliding of Si₃N₄/TiC ceramic against steel under dry friction. *Materials & Design*, 52, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.046>
- [109] White, N., Eder, K., Byrnes, J., Cairney, J. M., & McCarroll, I. E. (2020). Laser ablation sample preparation for atom probe tomography and transmission electron microscopy. *Ultramicroscopy*, 220, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2020.113161>
- [112] Riveiro, A., Soto, R., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Quintero, F., & Lusquiños, F., Pou, J. (2016). Texturing of polypropylene (PP) with nanosecond lasers. *Applied Surface Science*, 374, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.03.091>
- [116] Jagur-Grodzinski, J. (2006). Polymers for tissue engineering, medical devices, and regenerative medicine: A concise review of recent studies. *Polymer Advanced Technologies*, 17(6), 395–418. <https://doi.org/10.1002/pat.729>
- [122] Viville, P., Beauvois, S., Lambin, G., Lazzaroni, R., Brédas, J. L., Kolev, K., et al. (1996). Excimer laser-induced surface modifications of biocompatible polymer blends. *Applied Surface Science*, 96, 558–562. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(95\)00530-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(95)00530-7)
- [127] Shivakoti, I., Kibria, G., Cep, R., Pradhan, B. B., & Sharma, A. (2021). Laser surface texturing for biomedical applications: A review. *Coatings*, 11(2), 124. <https://doi.org/10.3390/coatings11020124>
- [128] Mirzadeh, H., Katbab, A. A., & Burford, R. P. (1995). CO₂ laser graft copolymerization of HEMA and NVP onto ethylene-propylene rubber (EPR) as biomaterial—III. Radiation Physics and Chemistry, 46(6), 859–862. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)00114-W](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)00114-W)
- [129] Koufaki, N., Ranella, A., Aifantis, K. E., Barberoglou, M., Psycharakis, S., Fotakis, C., & Stratakis, E. (2011). Control of cell adhesion by replication of laser micro/nano-textured surfaces on polymers. *Biofabrication*, 3(4), 045004. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/3/4/045004>
- [134] Bialas, O., Lis, M., Wozniak, A., & Adamiak, M. (2021). Laser surface fusion of gold nanoparticles with PEEK polymer for autodialyvascular applications. *Materials*, 14(4), 971. <https://doi.org/10.3390/ma14040971>