Utjecaj obrade površine laserskim snopom na kut kvašenja Ti legure

Školnik, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:836218

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Školnik

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Luka Školnik

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ponajprije se zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na ukazanoj prilici, jasnim savjetima, strpljenju i čistoj viziji oko rada. Također se zahvaljujem asistentu Draženu Mezdiću na neizmjernoj pomoći pri izvođenju i uputama pri pisanju rada.

Veliko hvala mojoj obitelji, posebice bakama i djedovima, na bezuvjetnoj podršci i vjeri u mene te prijateljima na strpljenju pri dugotrajnom učitavanju u rad.

Mojim roditeljima umjesto glazbenog albuma u izlogu.

Luka Školnik

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA ŠKOLNIK** Mat. br.: 0035201957

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj obrade površine laserskim snopom na kut kvašenja Ti legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effects of laser texturing on the contact angle of Ti alloy**

Opis zadatka:

Titanij i njegove legure zanimljive su u području medicine i zrakoplovne industrije zbog svoje inertnosti što im uveliko daje prednost spram drugih materijala. Najveći problem titanijevih legura je njihova slaba otpornost na trošenje. U cilju produljenja vijeka trajanja titanijevih legura te povećanja produktivnosti, sve je veća primjena postupaka prevlačenja tankim tvrdim prevlakama. Površine nisu idealno glatke već hrapave plohe opisane nizom neravnina različitih oblika, rasporeda i veličina. Završnom obradom površine želi se postići finija i ujednačenija površina što veće hidrofilnosti kako bi se kod prevlačenja spriječila promjena strukture i svojstava površina. Kvašenje predstavlja ključnu znanstvenu procjenu površinskih svojstava materijala u svrhu adsorpcije. Najčešće korištena tehnika za kvantificiranje kvašenja je mjerenje kontaktnog kuta. Kontaktni kut je mjera privlačnih ili odbojnih interakcija između molekula dviju faza, najčešće tekuće i čvrste faze. Mjerenjem kontaktnoga kuta između vodene kapi i čvrste faze može se odrediti svojstvo hidrofobnosti ili hidrofilnosti čvrste faze.
U ovom radu potrebno je:
1) Dati pregled dosadašnjih istraživanja u području inženjerstva površina povezanih s kutom kvašenja.
2) Mijenjajući parametre postupka laserske obrade postići različitu topografiju površine.
3) Analizirati topografiju površine skenirajućim elektronskim mikroskopom.
4) Izmjeriti hrapavost površine uzoraka.
3) Provesti ispitivanje kuta kvašenja nakon 20 sekundi i nakon 60 sekundi pod kutovima od 0°, 30° i 60°.
4) Na temelju analize i diskusije rezultata ispitivanja predložiti prikladnu hrapavost za povišenje hidrofilnosti.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
12. studenog 2020.	14. siječnja 2021.	18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. POVRŠINSKE POJAVE 3
2.1. Slobodna površinska energija 3
2.2. Površinska napetost 3
2.3. Kvašenje 4
2.4. Mjerenje kuta kvašenja 7
2.5. Histereza kuta kvašenja 9
3. HRAPAVOST POVRŠINA 11
3.1. Općenito o hrapavosti 11
3.2. Amplitudni parametri hrapavosti 11
3.3. Utjecaj hrapavosti na kvašenje 12
4. TITANIJ 13
4.1. Općenito o titaniju 13
4.2. Titanijeva legura Ti6Al4V 14
4.3. Kvašenje na površinama titanija 15
5. OBRADA POVRŠINE LASERSKIM SNOPOM 16
5.1. Općenito o laserima 16
5.2. Primjena lasera 17
5.3. Obrada površine laserskim snopom 18
6. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 20
6.1. Ovisnost kvašenja o vrsti obrade površine titanijevih legura [21] 20
6.2. Utjecaj laserske obrade na kontaktna svojstva titanijevih legura 22
6.3. Ovisnost kvašenja o brzini laserskog snopa 24
6.4. Utjecaj gustoće energije laserskog snopa na kvašenje [25] 26
6.5. Ovisnost kvašenja o frekvenciji lasera [26] 27
6.6. Ovisnost kvašenja o amplitudi i valnoj duljini oblika na površini [27] 28
6.7. Povećanje biokompatibilnosti legura titanija laserom [28] 29
29
7. EKSPERIMENTALNI DIO 30
7.1. Mehanička predobrada 30
7.2. Obrada laserom 31
7.3. Hrapavost uzoraka 31
7.4. SEM Analiza 33

8. MJERENJE I ANALIZA KUTA KVAŠENJA 35
8.1. Mjerenje kuta kvašenja 35
8.2. Rezultati kuta kvašenja 36
8.3. Histereza kuta kvašenja 42
9. ZAKLJUČAK 44
LITERATURA 45
PRILOZI 48

POPIS SLIKA

Slika 1. a) Titanijev implantat [1], b) Prevučeni dijelovi TIN prevlakom [2] 1
Slika 2. Površinska napetost kapljice [5] 4
Slika 3. a) Loše kvašenje, b) Dobro kvašenje, c) Potpuno kvašenje [3] 5
Slika 4. Primjer međufaznih pojava [3] 6
Slika 5. Shematski prikaz metode s mjehurićem [7] 7
Slika 6. Shematski prikaz metode ispitivanja kapilarnosti [7] 8
Slika 7. Faze kapljice pri doziranju: a) Trenutak doziranja, b) Dodir kapljice s površino ... 8
Slika 8. Histereza pri promjeni volumena kapljice [9] 9
Slika 9. Primjer kuteva histereze [10] 9
Slika 10. Histereza pri a) isparavanju b) kondenziranju i c) nagibu [12] 10
Slika 11. Shematski prikaz parametara hrapavosti [14] 12
Slika 12. Konstrukcijski materijali zrakoplova [5] 13
Slika 13. Vlačna čvrstoća titanijevih legura u ovisnosti o temperaturi [16] 14
Slika 14. Titanijev implantat u dentalnoj medicini [1] 15
Slika 15. Shematski prikaz dijelova lasera [18] 16
Slika 16. Lasersko rezanje [17] 17
Slika 17. Topografija površine pri brzini lasera od (a) 10 mm/s; (b) 200 mm/s [19] 19
Slika 18. SEM snimka površine legure titanija nakon laserskog graviranja [20] 19
Slika 19. Titanijeve legure obrađene: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21] 20
Slika 20. Parametar hrapavosti Ra nakon obrade: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21] 21
Slika 21. Kutevi kvašenja nakon obrade površine: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21] 21
Slika 22. Ovisnost faktora trenja o brzini klizanja [22] 22
Slika 23. Morfologija: a) početna, b) mikrotaljenje, c) makrotaljenje [23] 23
Slika 24. Ovisnost dubine teksturiranih tragova o brzini lasera [8] 24
Slika 25. Topografija pri različitim brzinama obrade laserom [24] 25
Slika 26. Kut kvašenja u ovisnosti o energiji lasera [25] 26
Slika 27. Utjecaj frekvencije lasera na a) parametar hrapavosti Rz, b) kut kvašenja [26] . 27
Slika 28. Omjer amplitude i valne duljine pri obradi laserom [27] 28
Slika 29. Ponašanje kapljice pri različitim amplitudama i valnim duljinama [27] 28
Slika 30. Rast stanica na površini titanija [28] 29
Slika 31. Uzorci nakon mehaničke predobrade površine 30
Slika 32. Uređaj za mjerenje hrapvosti Perthometer S8P 32
Slika 33. Grafički prikaz rezultata hrapavosti 33
Slika 34. SEM snimke uzoraka: a) Uzorak 1, b) Uzorak 2-5-2, c) Uzorak 3-5-1, ... 34
Slika 35. Goniometar Dataphysics Contact Angle System OCA 35
Slika 36. Proces mjerenja kuta kvašenja 36
Slika 37. Grafički prikaz srednjih vrijednosti kuteva kvašenja nakon 20 sekundi 41

Slika 38. Grafički prikaz srednjih vrijednosti kuteva kvašenja nakon 60 sekundi 42
Slika 39. Grafički prikaz histereze za a) Uzorak 1, b) Uzorak 2-5-2, c) Uzorak 3-5-1, ... 43
Slika 40. Profil hrapavosti uzorka 1 48
Slika 41. Profil hrapavosti uzorka 2-5-2 48
Slika 42. Profil hrapavosti uzorka 3-5-1 48
Slika 43. Profil hrapavosti uzorka 4-10-2 49
Slika 44. Profil hrapavosti uzorka 5-10-1 49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva legure Ti6Al4V. [16] 14
Tablica 2. Parametri laserske obrade 31
Tablica 3. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti uzoraka 32
Tablica 4. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri 0° 37
Tablica 5. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri nagibu od 30° 38
Tablica 6. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri nagibu od 60° 39
Tablica 7. Slike kuteva kvašenja nakon 60 sekundi 40
Tablica 8. Srednje vrijednosti kuteva kvašenja CA(M),[°] nakon 20 sekundi 41
Tablica 9. Srednje vrijednosti kuteva kvašenja CA(M),[°] nakon 60 sekundi 42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
R_z	μm	Zbroj visine najvećeg vrha i najveće dubine dola profila hrapavosti unutar referentne duljine
R_p	μm	Najveća visina vrha profila unutar referentne duljine
R_{max}	μm	Zbroj visine najvećeg vrha i najveće dubine dola profila hrapavosti unutar duljine vrednovanja
s	μm	Procijenjeno standardno odstupanje
$\bar{x}$	μm	Aritmetička sredina
θ	°	Kut kvašenja

SAŽETAK

Istraživanja kuta kvašenja na legurama titanija vrlo su raširena te se titanij često koristi kao biomaterijal ili se prevlači tankim tvrdim prevlakama u svrhu poboljšanja triboloških svojstava. U oba slučaja je u kontaktu s kapljevinom te je važno poznavati svojstva kvašenja. Dan je pregled dosadašnjih istraživanja u pogledu kuta kvašenja na površinama legura titanija. U eksperimentalnom dijelu rada ispitivana su svojstva kvašenja na leguri Ti6Al4V nakon obrade laserski snopom. Praćeno je ponašanje kuta kvašenja nakon 20 i 60 sekundi pri nagibima od 0°, 30° i 60°. Izmjereni su parametri hrapavosti te su površine uzoraka analizirane skenirajućim elektronskim mikroskopom.

Ključne riječi: Kut kvašenja, Ti6Al4V, obrada laserskim snopom

SUMMARY

Contact angle studies on titanium alloys are very common today because titanium is frequently used as a biomaterial or coated with thin hard coatings for the purpose of improving tribological properties. In both cases it is in contact with the liquid and it is important to know the contact angle properties. An overview of previous research regarding wetting on the surfaces of titanium alloys is given. In the experimental part of the paper, the contact angle properties of Ti6Al4V alloy after laser treatment were studied. The behavior of the contact angle after 20 and 60 seconds at inclinations of 0°, 30° and 60° was monitored. Roughness parameters were measured and sample surfaces were analyzed with a scanning electron microscope.

Key words: Contact angle, Ti6Al4V, laser beam processing

1. UVOD

Titanij i njegove legure svoju primjenu nalaze u visokotehnološkim granama industrije kao što su medicina, zrakoplovstvo i svemirska industrija. Inertnost, mala gustoća i visoka specifična čvrstoća samo su neka od povoljnih svojstava titanijevih legura [1]. Međutim, kako bi im se povećala otpornost na trošenje i produžio vijek trajanja prevlače se tankim tvrdim prevlakama [2].

Kod prevlaka je posebno važna prionjivost površinskog sloja na osnovi materijal koja ovisi o tribološkim svojstvima materijala, kutu kvašenja i hrapavosti. Tribološka svojstva i hrapavost igraju i veliku ulogu kod bio implantata jer moraju omogućiti oseointegraciju, odnosno dugoročno spajanje i kompatibilnost implantata i kosti [1]. Kao najčešći primjeri uporabe titanijevih legura na slici 1. su prikazani dijelovi implantata različitih hrapavosti i prevučeni dijelovi TIN prevlakama.



a) b)

Slika 1. a) Titanijev implantat [1], b) Prevučeni dijelovi TIN prevlakom [2]

Kvašenje pak određuje na koji način će se tjelesne tekućine ponašati u prisutstvu implantata, te s druge strane kakvo će biti ukapljivanje iz parne faze na samom materijalu kod prevlačenja tvrdim prevlakama [1].

Zbog toga je kvašenje od iznimne važnosti za legure titanija, a posebno za najčešće korištenu leguru titanija Ti6Al4V. Nadalje, hidrofilnost ili hidrofobnost neke površine se dobiva iz svojstava kuta kvašenja koja nastaju eksperimentalnim putem. Upravo su svojstva kvašenja na navedenoj leguri Ti6Al4V predmet istraživanja ovog rada kako bi se postigla prikladna hrapavost za povišenje hidrofilnosti [3].

2. POVRŠINSKE POJAVE

Površinske pojave nastaju na granici različitih faza kao što su: čvrsto–tekuće, čvrsto–plinovito, tekuće–plinovito i čvrsto–tekuće–plinovito. U površinske pojave ubrajaju se kvašenje, slobodna površinska energija, površinska napetost, razlijevanje, kapilarno prodiranje tekućine i slično [4].

2.1. Slobodna površinska energija

Slobodna površinska energija je pojava suviška energije na granici faza. Do nje dolazi jer molekule na granici faza nisu sa svih strana okružene istovrsnim molekulama.

To se može objasniti i tako što je svaka čestica koja je sastavni dio materije neke tvari okružena istovrsnim česticama. Te čestice međusobno djeluju jednakom silom suprotnog iznosa te se njihovo međudjelovanje poništi. Međutim, čestice na granici faza odnosno na površini to međudjelovanje kompenziraju upravo preko slobodne površinske energije [4].

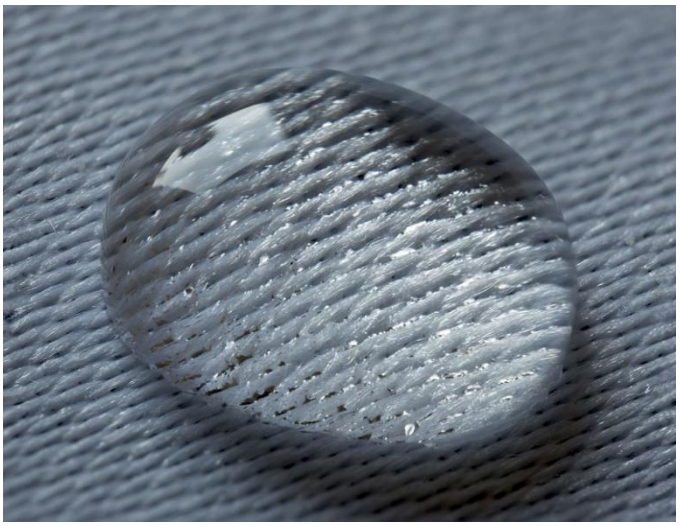
Slobodna površinska energija krutine se računa mjerenjem kuta kvašenja kapljica različitih tekućina kojima je poznata površinska napetost. Kut kvašenja može biti između 0° i 180°. Pri kutu od 0 ° kvašenje je potpuno zastupljeno, dok pri kutu od 180° u potpunosti izostaje [4].

Manja slobodna površinska energija će rezultirati većim kutem, odnosno lošijim kvašenjem tekućine. Do toga dolazi jer su privlačne sile unutar tekućine jače od privlačnih sila između površinske energije i tekućine. Shodno tome, kvašenje će biti bolje što je veća slobodna površinska energija i što je manja njena površinska napetost.

2.2. Površinska napetost

Površinska napetost se javlja kao posljedica slobodne površinske energije na površini tekućine. To je sila koja djeluje okomito na površinu tekućine i djeluje tako da smanjuje ukupnu površinu tekućine.

Smanjenjem površine tekućine postiže se stanje niže energije kojem teže sve tvari u prirodi. Tekućine teže smanjenju slobodne površinske energije stvaranjem oblika s najmanjom površinom, odnosno kugle ili kapljica. Oblik kapljice kao produkt površinske napetosti je prikazan na slici 2.



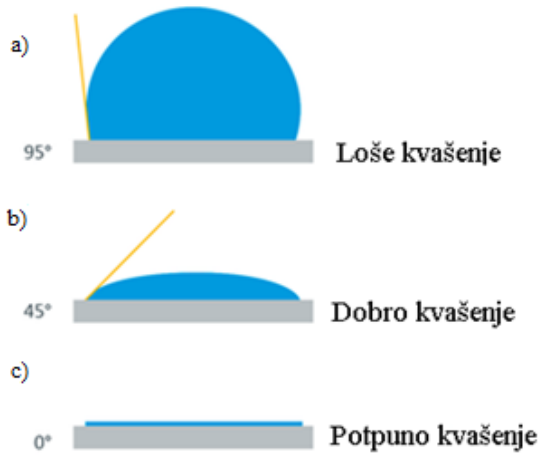
Slika 2. Površinska napetost kapljice [5]

Napetost površine ovisi o njezinim svojstvima, ali i o svojstvima tvari s kojom je u kontaktu te o temperaturi. Povećanjem temperature okoline povećava se kinetička energija čestica, one se brže gibaju i slabe veze između molekula te se površinska napetost smanjuje. Pri smanjenju temperature okoline efekt je obrnut, a površinska napetost se smanjuje [4].

2.3. Kvašenje

Kvašenje je svojstvo tekućine da održi kontakt s čvrstom površinom. Mjera kvašenja je kut kvašenja koji govori o ravnoteži između kohezivnih i adhezivnih sila te je ujedno jedan od glavnih pokazatelja slobodne površinske energije. Istraživanja vezana uz kvašenje površina raznih materijala vrlo se raširena zbog potrebe za usavršavanjem tehnologija u područjima spajanja površina, prevlačenja površina te nanomaterijala [3].

Nadalje, što je površina hidrofilnija kut kvašenja će biti manji. Veći kut kvašenja se može očekivati kod hidrofobnih površina. Također, kvašenje je iznimno važno kod biomaterijala jer uz kemijska i topografska svojstva regulira reakciju stanice i organizma prema samom materijalu. Primjeri različitih tipova kvašenja su prikazani na slici 3 [3].



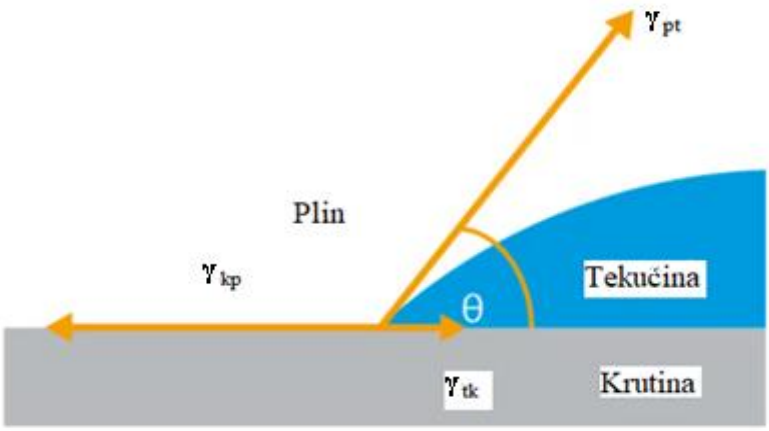
Slika 3. a) Loše kvašenje, b) Dobro kvašenje, c) Potpuno kvašenje [3]

Kvašenje je izuzetno važan čimbenik u proizvodnim procesima koji utječe na lijepljenje, čišćenje i prianjanja površina. Kut kvašenja ovisi o parametrima površine kao što su topologija, kemijski sastav i temperatura. Eksperimentalno izmjeren kut kvašenja izmjeren na površinama uzoraka se vrlo često daje kao prosjek nekoliko mjerenja.

Svaki materijal ima različita svojstva kvašenja, no pri svakom kvašenju dolazi do kontakta triju faza: plinovite, tekuće i krute. Shematski prikaz tog kontakta se nalazi na slici 4.

Prema Youngovoj relaciji (1) postoji veza između kontaktnog kuta θ, površinske napetosti tekućine γ_{pt}, međufazne napetosti γ_{tk} između tekućine i krutine i površinske slobodne energije γ_{kp} krutine [3]:

$$\gamma_{kp} = \gamma_{tk} + \gamma_{pt} * \cos\theta \quad (1)$$



Slika 4. Primjer međufaznih pojava [3]

U Youngovoj relaciji (1) postoje samo dvije mjerljive veličine, kut kvašenja θ i površinska napetost tekućine γ_{pt} koje je potrebno odrediti kako bi se mogle odrediti i ostale veličine u jednadžbi. Zbog toga je pokrenut velik broj istraživanja kuteva kvašenja kako bi se razvile metodologije određivanja slobodne površinske energije [6].

Youngova relacija je isključivo teoretska i pri pojavi heterogenosti na površini dolazi do odstupanja te nije u potpunosti primjenjiva. Youngova relacija vrijedi za sljedeće uvjete [6]:

1. Na idealno glatkim površinama koje ne sadrže heterogenosti.
2. Vrijednosti ostalih veličina u Youngovoj relaciji se ne mijenjaju za vrijeme mjerenja kuta kvašenja, odnosno ne dolazi do međusobnih reakcija faza.
3. Koriste se samo čiste tekućine kako ne bi došlo do njihovog međusobnog miješanja.

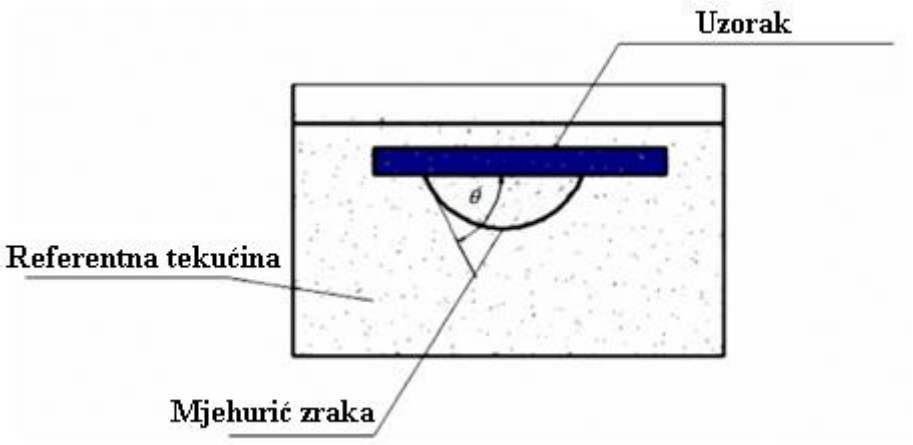
Na temelju Youngovog modela razvijeni su i drugi modeli koji su primjenjivi na hrapavim i heterogenim površinama. Među njima su najpoznatiji modeli Wenzelov i Cassie-Baxterov. Prednosti oba modela nad Youngovim je to što su eksperimentalno primjenjivi [6].

Zrak unutar poroziteta površina sustav čini heterogenim i takav sustav spada u Cassie-Baxterov model. Međutim, ako tekućina prodre u pore, površina se vraća homogenosti i prelazi u stanje Wenzelovog modela. Prijelazi između Cassie-Baxterovog i Wenzelovog stanja mogu se dogoditi kada se na tekućinu na površini primijene vanjski podražaji poput tlaka ili vibracija [6].

2.4. Mjerenje kuta kvašenja

Postoji više metoda za mjerenje kuta kvašenja, a najčešće su [7]:

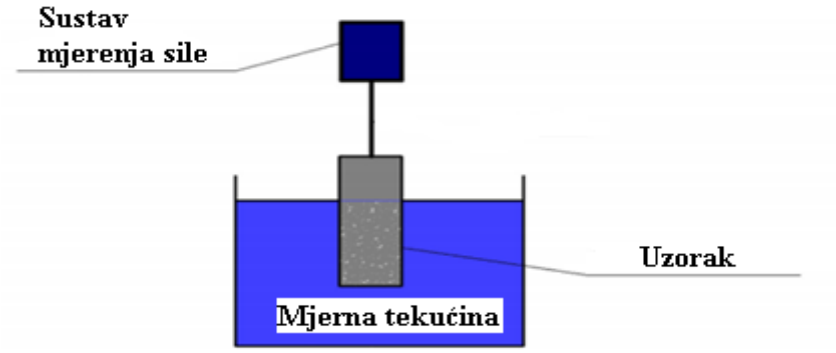
- Metoda s mjehurićem
- Geometrijske metode
- Metode ispitivanja kapilarnosti



Slika 5. Shematski prikaz metode s mjehurićem [7]

U metodi s mjehurićem prikazanoj na slici ispitivani uzorak u obliku pločice se horizontalno uroni u ispitivanu tekućinu. Zatim se ispod površine uzorka dozira mjehurić zraka te se iz oblika mjehurića određuje kut kvašenja [7].

Metode ispitivanja kapilarnosti temelje se na mjerenjima sile koja je potrebna za savladati otpor tekućine kada je u nju uronjen čvrsti uzorka znanih svojstava. Metoda ispitivanja kapilarnosti se još zove i Wilhemyjeva metoda. Mjerenje kuta kvašenja Wilhemyjevom metodom daje najpreciznije rezultate. Metoda ispitivanja kapilarnosti pri uranjanju i izranjanju čvrste tvari u tekućinu je prikazana na slici 6 [7].



Slika 6. Shematski prikaz metode ispitivanja kapilarnosti [7]

U ovom radu kut kvašenja je mjeren metodom viseće kapi koja spada u geometrijske metode i mjeri se na goniometru. Goniometar jer uređaj za mjerenje kuta kvašenja na najčešće krutim uzorcima. Mjerenja se provode tako da se kap testne kapljevine nanese na uzorak pomoću sustava za injektiranje. Nakon uspostavljanja ravnoteže u sustavu kapljica-površina mjeri se kontaktni kut koji kapljica zatvara s površinom. Kapljica se također kontrolira preko optičkog sustava s kamerom kako ne bi došlo do prevelikih odstupanja u volumenu i obliku kapljice. Naime, takva odstupanja mogu rezultirati lošim mjerenjima i kasnije lošim zaključcima jer se vrijednost kuta kvašenja dobiva kao prosječna vrijednost 5-10 mjerenja [4].

Mogu se koristiti i 3 različite referentne tekućine ako se mjeri slobodna površinska energija. Nakon što prođe jednako vrijeme za sve kapljice od doziranja, uslika se stanje kapljice na površini te se kasnije analizira. Važnost prolaska jednakog vremenskog intervala za sve kapljice je u tome što se s prolaskom vremena geometrija kapljica može znatno promijeniti i ispravno je uspoređivati rezultate kuta kvašenja samo nakon istog prolaska vremena. Karakteristične faze kroz koje prolazi kapljica nakon doziranja su prikazane na slici 7 [8].

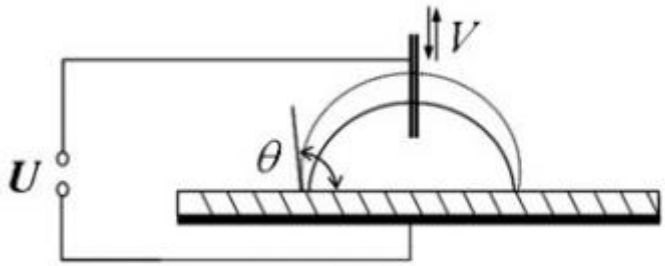


Slika 7. Faze kapljice pri doziranju: a) Trenutak doziranja, b) Dodir kapljice s površinom, c) Trenutak mjerenja kuta kvašenja [8]

2.5. Histereza kuta kvašenja

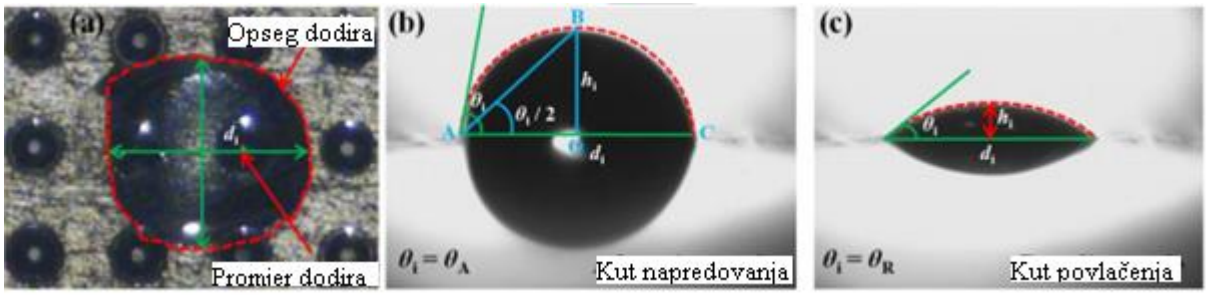
Histereza kuta kvašenja je važan fizikalni proces koji se osim u prirodi javlja i kod brojnih industrijskih procesa. Histereza kontaktnog kuta jest interval, odnosno razlika između kutova napredovanja i kutova povlačenja na nekoj površini. Kut napredovanja govori o maksimalnom kontaktnom kutu koji površina može imati, a kut povlačenja predstavlja minimalni kut iste površine [9].

Raspon kuteva povlačenja i napredovanja kapljevine je moguće postići polaganim, kontroliranim upumpavanjem ili ispumpavanjem kapljevine iz kapljice. Histereza kuteva kvašenja pri promjeni volumena kapljice prikazana je na slici 8 [9].



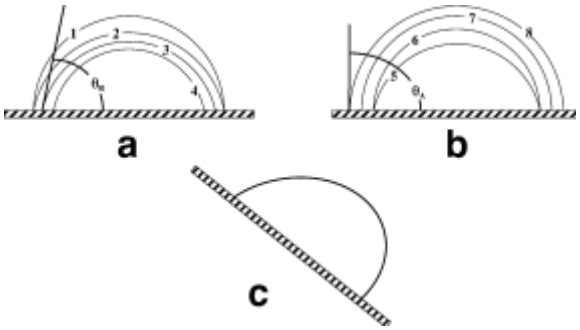
Slika 8. Histereza pri promjeni volumena kapljice [9]

Slika 9. prikazuje pogled odozgo te bočne poglede kapljice na površini uzorka te određuje kuteve napredovanja i povlačenja. Pod b) je prikazan kut napredovanja koji je vidljivo veći od kuta povlačenja pod c). Ako razlika kuta napredovanja i povlačenja nije nula to govori da takav sustav posjeduje histerezu [10]. Općenito u fizici histereza predstavlja ovisnost sustava o njegovom prijašnjem stanju. [11]



Slika 9. Primjer kuteva histereze [10]

Histereza je ostvariva i nanošenjem kapljice na površinu te prolaskom određenog vremena. Do toga dolazi zbog procesa postizanja ravnoteže unutar kapljice u kontaktu kapljice i nesavršeno ravne površine te zbog isparavanja. Upravo je takva histereza predmet istraživačkog dijela ovog rada i prikazana je na slici 10. Mjeren je kut kvašenja nakon 20 te nakon 60 sekundi pri različitim nagibima i shodno tome je izračunata histereza [12].



Slika 10. Histereza pri a) isparavanju b) kondenziranju i c) nagibu [12]

Primjer histereze je kada kap kiše padne na lim automobila. Kapljica kiše s dodirnom površinom zatvara određeni kut. Svaka kapljica će se razlikovati u obliku, a kut se može mijenjati i do 20° ovisno o vrsti kontaktne površine. U okruženju s niskom vlagom kapljica se smanjuje u volumenu. Ako dođe do kondenziranja volumen kapljice raste. U oba slučaja će doći do promjene kuta kvašenja kao što je prikazano na slici 8. a) i b) [12].

No nije nužno da takvi događaji napredovanja i povlačenja kuta kvašenja budu sinkronizirani. To su često vrlo različiti procesi s različitim energijama aktivacije što sugerira da su energija aktivacije promjene kuta kvašenja kapljice i histereza vrlo složeni problemi. Zbog toga točni podaci o histerezi sustava se nerijetko mogu dobiti samo eksperimentalnim pristupom [12].

3. HRAPAVOST POVRŠINA

3.1. Općenito o hrapavosti

Hrapavost površine indirektno je povezana s mehaničkim svojstvima i time je jedan od glavnih faktora koje se mora uzeti u obzir u mnogim procesima u strojarstvu kao što su osiguranje kvalitete, proračuni vijeka trajanja pa sve do prevlačenja i spajanja površina [13].

Tehničkim površinama smatramo one površine dobivene određenom vrstom obrade te one koje će morati ispunjavati neke eksploatacijske zahtjeve. U tom kontekstu tehničkih površina hrapavost je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta [13].

Veličina hrapavosti tehničkih površina može utjecati na [13]:

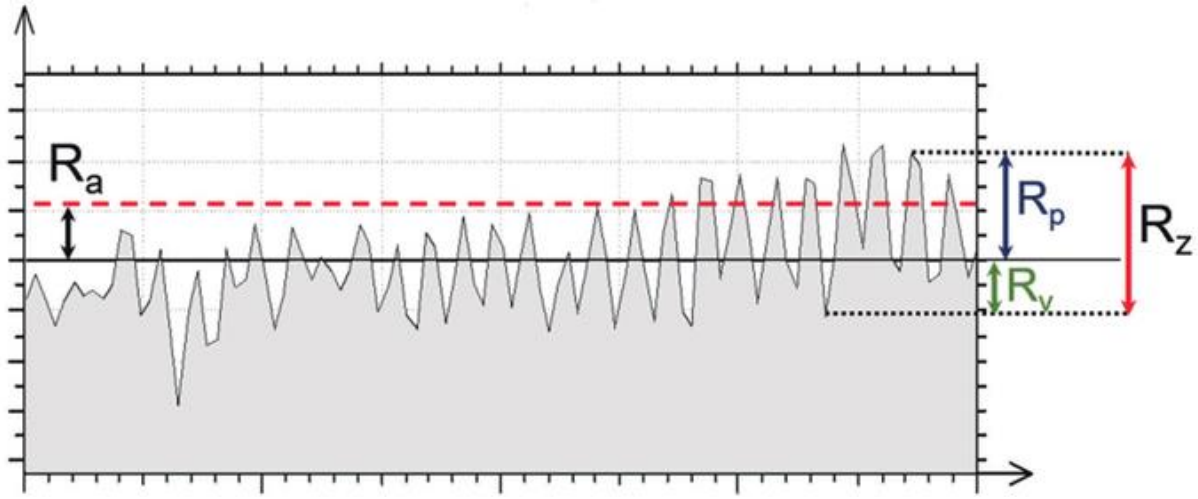
- Smanjenje dinamičke izdržljivosti
- Pojačano trenje i trošenje
- Smanjenje dosjeda kod steznih spojeva, a time i smanjenje nosivosti
- Ubrzanje korozije
- Mehanizme prevlačenja površina

3.2. Amplitudni parametri hrapavosti

Amplitudni parametri hrapavosti opisuju varijacije po visini profila hrapavosti. Najvažniji amplitudni parametri hrapavosti za ovaj rad su R_a, R_z, R_p, R_v i $R_{max.}$ Parametri predstavljaju [13]:

- R_a - srednje aritmetičko odstupanje profila
- R_z - zbroj visine najvećeg vrha i najveće dubine dola profila hrapavosti unutar referentne duljine
- R_p - najveću visinu vrha profila unutar referentne duljine
- R_v - najveću dubinu dola profila unutar referentne duljine
- R_{max} - zbroj visine najvećeg vrha i najveće dubine dola profila hrapavosti unutar duljine vrednovanja

Mjerna jedinica svih amplitudnih parametara hrapavosti je μm. Detaljni prikaz amplitudnih parametara hrapavosti nalazi se na slici 11. Jasno je vidljivo da će parametar R_z ovisiti o promjeni parametara R_p i R_v [13].



Slika 11. Shematski prikaz parametara hrapavosti [14]

3.3. Utjecaj hrapavosti na kvašenje

Kod spajanja površina povećanje hrapavosti do određene vrijednosti rezultira jačanjem spoja. Do toga dolazi jer se poveća ukupna površina spoja. Daljnjim povećanjem hrapavosti ipak dolazi do slabljenja spoja pri spajanju dvije površine. Ta hrapavost nakon koje spoj počne slabiti zove se kritična hrapavost. Isti fenomen se javlja i kod kvašenja. Smatra se da postoji vrijednost hrapavosti do koje će njezino povećanje rezultirati boljim kvašenjem [15].

Općenito je prihvaćeno da parametar hrapavosti R_a <0,5 μm neće utjecati na kut kvašenja. Površinska hrapavost je također jedan od glavnih uzroka histereze kod kvašenja zbog toga što čini površinu heterogenom [15].

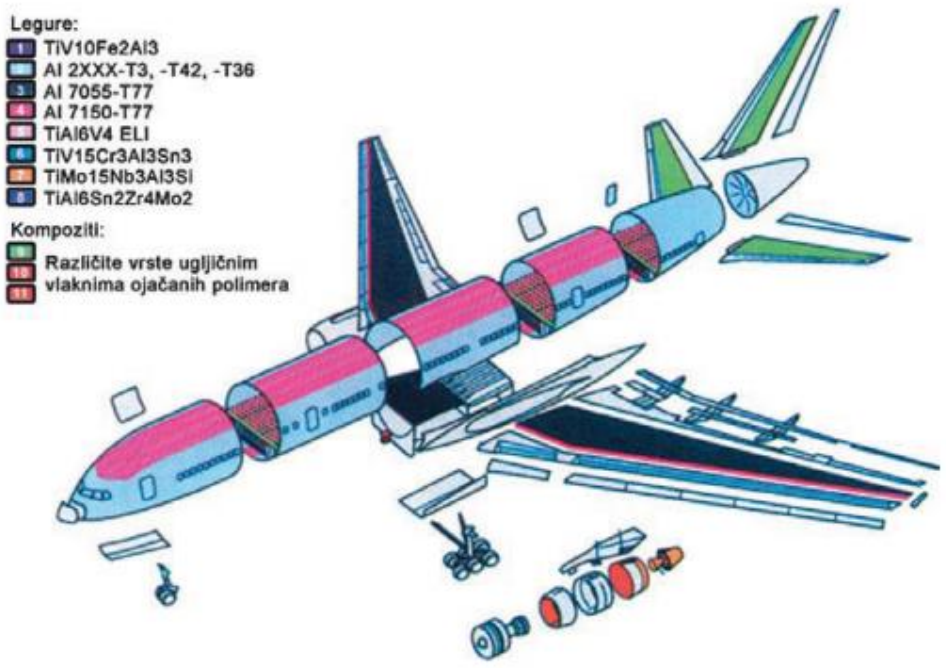
4. TITANIJ

4.1. Općenito o titaniju

Titanij se ubraja u vrlo raširene elemente te ga u zemljinoj kori ima oko 0,7%. U prirodi se nalazi u mineralima rutilu (TiO_2) i ilmenitu ($FeTiO_3$). Industrijska proizvodnja titanija i njegovih legura počinje značajnije rasti nakon 2. svjetskog rata kada je zbog svoje male gustoće, visokog tališta i dobrih mehaničkih svojstava bio jedan od najboljih materijala za svemirska istraživanja [16].

Legure titanija su tehnički superiorni konstrukcijski materijali koji se koriste zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, medicini, automobilskoj industriji, brodogradnji, kemijskoj industriji i arhitekturi. Uporaba u brodogradnji i kemijskoj industriji počiva na vrlo dobroj korozijskoj otpornosti. Odlična biokompatibilnost jest glavni razlog primjene titanijevih legura u medicini [16].

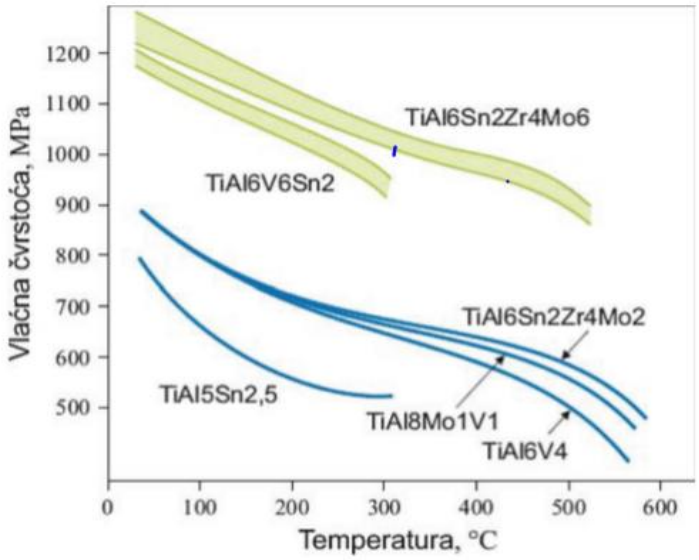
U zrakoplovstvu se koriste zbog male mase i visoke čvrstoće što rezultira znatno manjom masom dijelova. Velika rasprostranjenost titanijevih legura u zrakoplovstvu je prikazana na slici 12 [16].



Slika 12. Konstrukcijski materijali zrakoplova [5]

4.2. Titanijeva legura Ti6Al4V

Titanijeve legure imaju prednost nad drugim inženjerskim materijalima zbog povoljnog omjera čvrstoće i gustoće u širokom temperaturnom području od -200 °C do 550 °C. Ovisnost čvrstoće o temperaturi nekih titanijevih legura je prikazana na slici 13. Titanijeve legure također imaju značajnu otpornost na umor i puzanje, uz otpornost na koroziju postojane su i u različitim agresivnim medijima [16].



Slika 13. Vlačna čvrstoća titanijevih legura u ovisnosti o temperaturi [16]

Ti6Al4V je titanijeva α + β legura čija se mikrostruktura može mijenjati toplinskom obradom kako bi se postigla željena uporabna svojstva. Ti6Al4V je najčešće korištena legura titanija i njezina osnovna svojstva su prikazana u tablici 1 [16]. Upravo su ispitivanja na leguri titanija Ti6Al4V predmet istraživanja eksperimentalnog dijela ovog rada.

Tablica 1. Mehanička svojstva legure Ti6Al4V. [16]

R_e, MPa	830
R_m, MPa	900
E, GPa	113,7
A, %	14
Z, %	30

4.3. Kvašenje na površinama titanija

Kvašenje na površinama titanija je od iznimne važnosti jer se titanij vrlo često koristi u medicinske svrhe zbog svoje male gustoće i visoke čvrstoće te zadovojavajuće krutosti. Ujedno je i jedan od najraširenijih biomaterijala, prvenstveno zbog svoje biokompatibilnosti i mogućnosti oseointegracije. Na slici 14. je prikazan vijak titanijeve legure koje se često koriste u dentalnoj medicini za funkcije kruna, mostova i kirurških vijaka [1].

Jedan od čimbenika biokompatibilnosti jest i kut kvašenja jer su takvi biomaterijali namijenjeni okruženjima sa stalnom izloženošću ljudskoj krvi. Reakcija krvi i ljudskog imunološkog sustava na titanove legure ovisi o biotribološkim svojstvima legure. Na biokompatibilnost i kut kvašenja je moguće utjecati preko obrade površine [1].



Slika 14. Titanijev implantat u dentalnoj medicini [1]

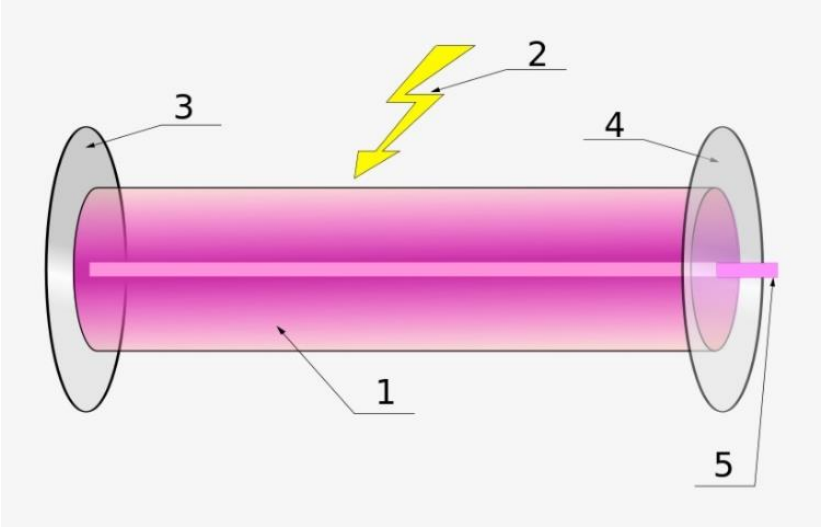
5. OBRADA POVRŠINE LASERSKIM SNOPOM

5.1. Općenito o laserima

Laser je uređaj koji stimulira atome ili molekule da emitiraju svjetlost na određenim valnim duljinama i pojačava tu svjetlost, obično proizvodeći vrlo uski snop zračenja. Riječ laser je kratica za "light amplification by the stimulated emission of radiation"[17].

Emisija općenito pokriva izuzetno ograničen raspon vidljivih, infracrvenih ili ultraljubičastih valnih duljina. Osnovni dijelovi lasera su prikazani na slici 15. [17]:

1. Aktivni medij
2. Izvor energije
3. Visokoreflektivno zrcalo
4. Polupropusno zrcalo
5. Izlazna zraka



Slika 15. Shematski prikaz dijelova lasera [18]

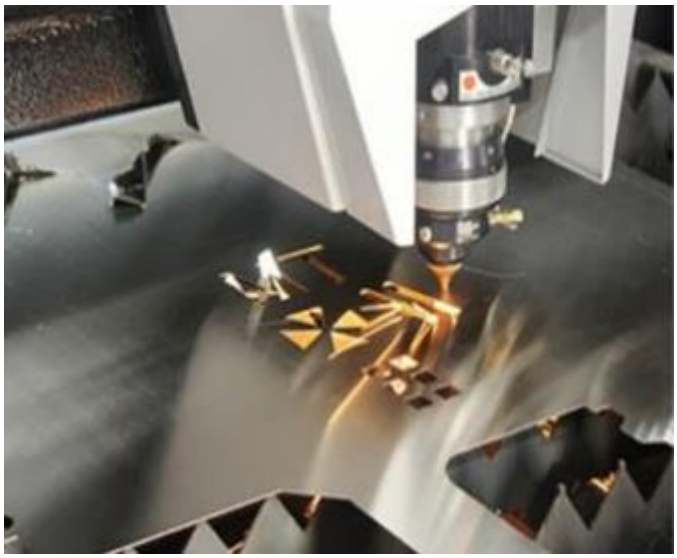
Laserska obrada se zasniva na primjeni koncentrirane fotonske energije fokusirane na malu površinu materijala. Kada se laserska zraka usmjeri na materijal ona na njega djeluje određenom energijom. Ovisno o parametrima laserske zrake ta energija može dovesti do zagrijavanja, taljenja ili isparavanja materijala [17].

5.2. Primjena lasera

Laseri se danas primjenjuju u raznim područjima ljudske aktivnosti. Primjena im je jako široka zbog njihove učinkovitosti i raznolikosti te se očekuje se da će u budućnosti samo rasti. Prema primjeni laseri se mogu podijeliti u sljedeće skupine [17]:

- Primjena u industriji
- Primjena u znanosti i tehnologiji
- Primjena u vojne svrhe
- Primjena u medicini
- Primjena u svakodnevnom životu

Upotrebu u obradi materijala lasera omogućuju velika snaga i visoki intenzitet modernih lasera. Zbog toga što pulsevi lasera traju kratko interakcija medija i materijala vrlo je kratka prilikom rezanja ili bušenja materijala. S obzirom na to da ne dolazi do taljenja, ostaju čisti rubovi reza ili rupe. Primjer laserskog reza prikazan je na slici 16 [17].



Slika 16. Lasersko rezanje [17]

Zavarivanje se ostvaruje CO_2 laserom usmjeravanjem laserskog snopa u jednu točku da bi se dobila dovoljna snaga za topljenje dva ili više spojenih materijala. Taj spoj se odmah i hladi da bi bio što čvršći [17].

Laseri se danas također često koriste u istraživačkim granama gdje su važni za napredak znanosti i tehnologije. Primjenjuju se u istraživanju i unapređivanju telekomunikacija, astronomiji, spektroskopiji, fotokemiji, holografiji.[17].

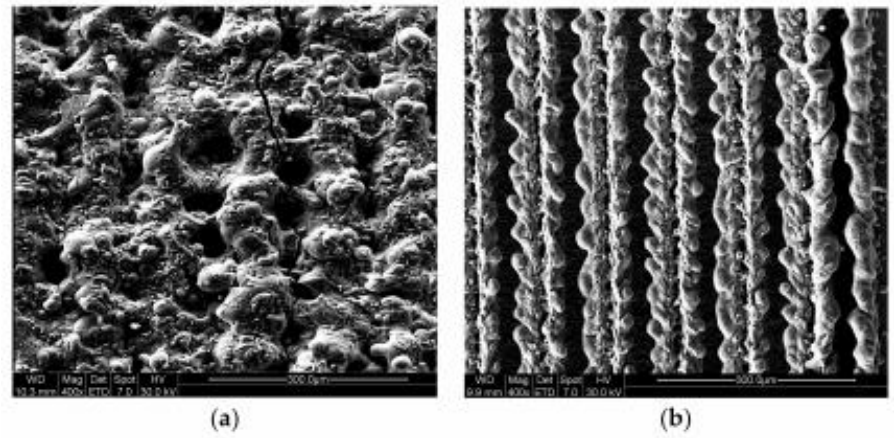
5.3. Obrada površine laserskim snopom

Proces obrade laserskim snopom može potaknuti stvaranje modificiranih slojeva materijala posebne topografije za određene primjene. Kroz varijacije laserskih parametara obrade mogu se kontrolirati dimenzije i geometrija linija na površini. Brzina laserskog snopa je jedan od glavnih parametara koji utječe na izgled i svojstva površine [19].

Povećanje brzine laserskog snopa rezultira pojavom manje energije na površini, što rezultira smanjenju parametara hrapavosti koji definiraju maksimalne dimenzije profila hrapavosti. U ovom aspektu oblik i dimenzije laserskih tragova pokazuju značajne razlike kao funkcija brzine laserskog snopa. Postignut je naglasak dubljih i oštrijih utora za niže brzine laserskog snopa do polukružnih i plitkih žljebova za veće brzine [19].

Otkriven je značajan odnos između dubine utora modificiranog sloja i hidrofobne karakteristike površine. Povećanjem brzine dolazi do stvaranja brazda definirane geometrije, rezultirajući povećanjem kontaktne površine s tekućom fazom.

Za male brzine laserske obrade (10 mm/s), volumen isparenog materijala je vrlo visok zbog duže izloženosti lokaliteta laseru što dovodi do manje uređene topografije u odnosu na visoke brzine laserske obrade (200 mm/s). To je vidljivo na slici 17. koja prikazuje razliku u topografiji površina pri malim i velikim brzinama laserskog snopa [19].



Slika 17. Topografija površine pri brzini lasera od (a) 10 mm/s; (b) 200 mm/s [19]

Laserskim snopom se mogu postići različite veličine mikro kratera te je podešavanjem parametara lasera moguće dobiti površine s kontroliranom hidrofilnošću. Posebno područje je lasersko graviranje u kojem je moguće postići teksture prikazane na slici 18. [20].



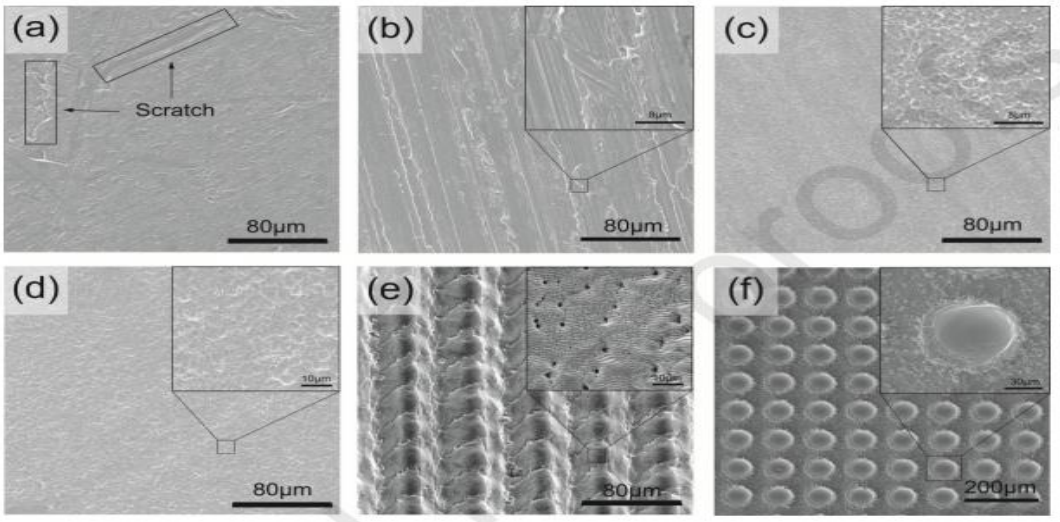
Slika 18. SEM snimka površine legure titanija nakon laserskog graviranja [20]

U eksperimentalnom dijelu rada za obradu uzoraka korišten je femtosekundni laser. Femtosekundni laseri emitiraju niz pulseva vremenskog trajanja nekoliko desetaka femtosekundi.

6. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

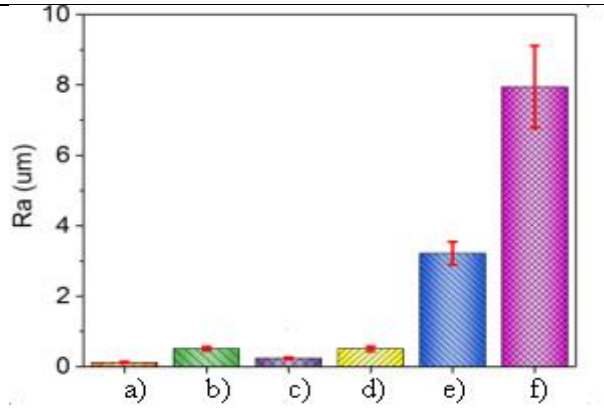
6.1. Ovisnost kvašenja o vrsti obrade površine titanijevih legura [21]

Topologija i slobodna površinska energija glavni faktori koji utječu na svojstva kvašenja. Stoga su oblik i vrsta tretiranja površine od iznimne važnosti. Na slici 19. su prikazane površine legure titanija obrađene: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21].



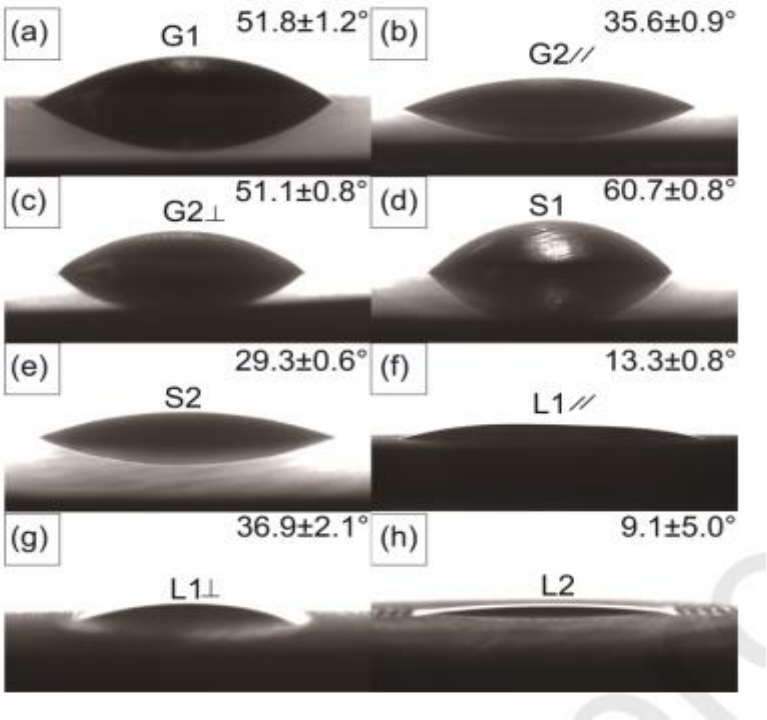
Slika 19. Titanijeve legure obrađene: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21]

Na površinama pripremljenim različitim vrstama obrade je izmjeren parametar hrapavosti R_a koji predstavlja srednje aritmetičko odstupanje profila. Rezultati mjerenja su prikazani na slici 20. Vidljivo je da površina obrađena točkastim laserskim snopom ima najveći parametar R_a, odnosno odstupanje, jer postoje dijelovi površine koji uopće nisu zahvaćeni laserom. Međutim sam parametar R_a ne govori puno sam za sebe već bi bilo korisno da se može raspoznati raspored vrhova i dolova na površini preko drugih parametara kao što su R_p ili R_v koji predstavljaju najviši vrh i najdublji dol profila [21].



Slika 20. Parametar hrapavosti Ra nakon obrade: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21]

Promjenom oblika bilo koje površine promijenit će se i njena slobodna površinska energija te shodno tome svojstva kvašenja. Samim time različite vrste obrada površine će rezultirati hidrofilnošću ili hidrofobnošću materijala. Na slici 21. su prikazani rezultati kuteva kvašenja za uzorke obrađene a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21].

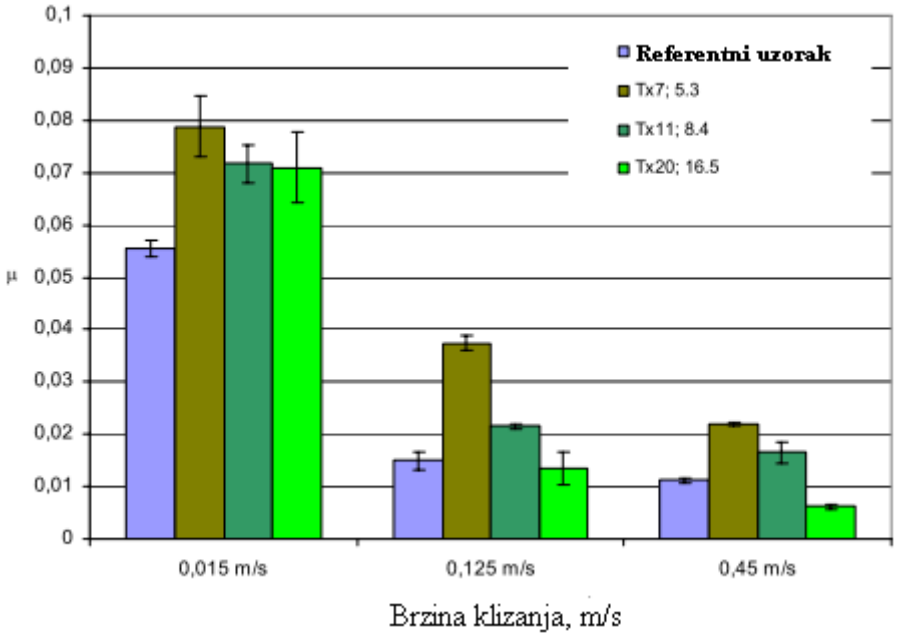


Slika 21. Kutevi kvašenja nakon obrade površine: a) brušenjem, b) čeonim brušenjem, c) pjeskarenjem dijamantnim pijeskom i nagrizanjem, d) pjeskarenjem i nagrizanjem, e) linijskom laserskom obradom, f) točkastom laserskom obradom [21]

Može se zaključiti da kod vrsta obrada kao što su čeono brušenje i obrada laserskim snopom kut kvašenja ovisi o orijentaciji nastalih linija na površini. Kod obje vrste obrada kvašenje je bolje ako se kapljica dozira paralelno uz linije obrade. Nadalje, najbolje kvašenje je za slučaj obrade točkastim laserom iako je taj slučaj imao najveće odstupanje R_a [21].

6.2. Utjecaj laserske obrade na kontaktna svojstva titanijevih legura

Tribološke površine se mogu mehanički obraditi s ciljem smanjenja trenja u uvjetima klizanja. To se postiže preko definiranih mikro jamica koje djeluju kao spremnici za mazivo. Dimenzije tih jamica odnosno njihova različita dubina se može postići promjenom parametara lasera. Napravljena je usporedba faktora trenja pri različitim brzinama klizanja za mikro jamice 3 različite dubine i grafički je prikazana na slici 22. [22].



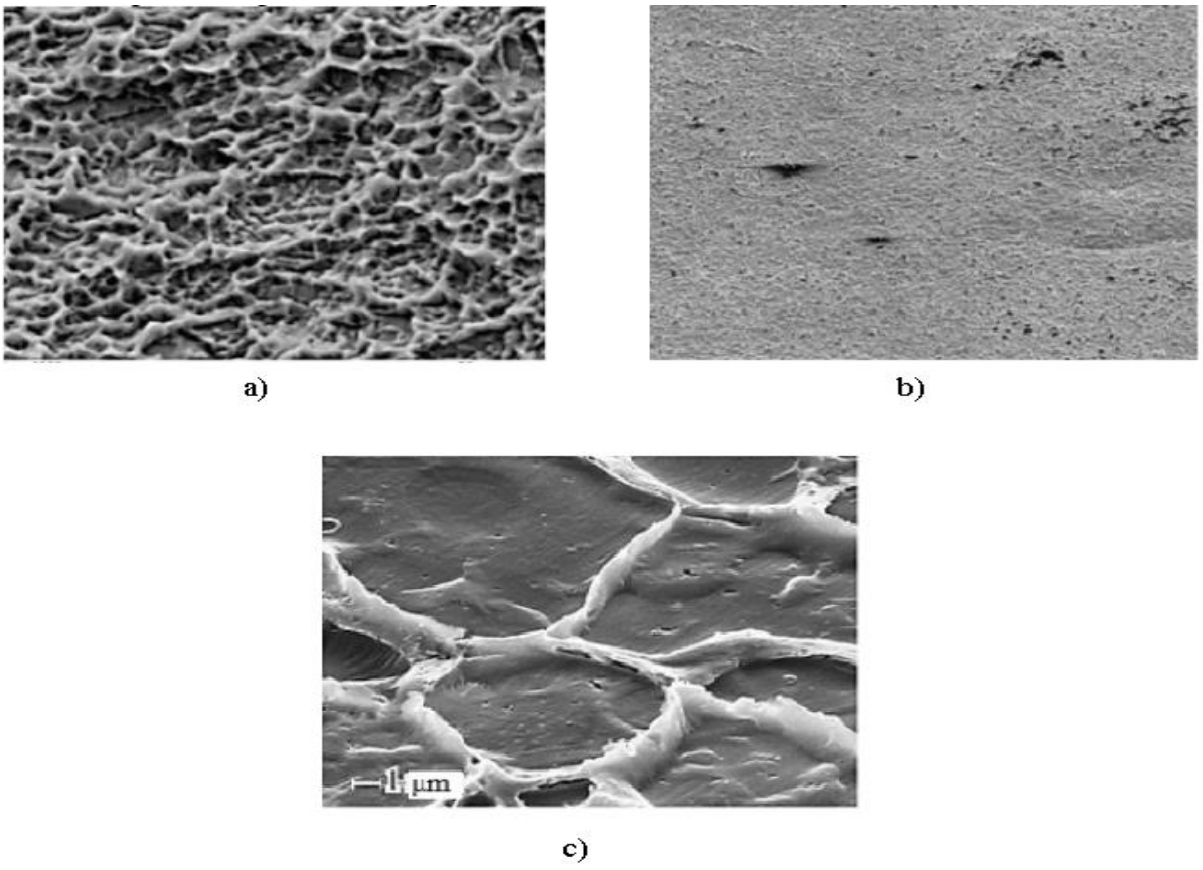
Slika 22. Ovisnost faktora trenja o brzini klizanja [22]

Vidljivo je da faktor trenja pada s porastom brzine klizanja. Isto tako, pozitivni učinak imaju i najdublje mikro rupice koje još više smanjuju trenje. Pri većim brzinama klizanja te mikro jamice mogu služiti kao mikro tlačne komore koje pospješuju dinamički kontakt. Postignut je minimalni faktor trenja od 0,006 za dubinu jamica 16.5 μm i brzinu klizanja 0.45 m/s [22].

Nadalje, postoji i velika razlika u morfologiji primjenjuje li se taljenje laserom na mikro ili makro razini. Slika 23. prikazuje površinske strukture uzoraka legure titanija nakon različitih laserskih tretmana površine. Pod a) je prikazano početno stanje površine, pod b) stanje nakon mikro obrade i pod c) stanje nakon makro obrade [23].

Mikro obradom se postiže najglađa površina s najmanje odstupanja u vrhovima i dolovima. Makro obrada pak rezultira sa stvaranjem zasebnih lokaliteta sa značajnom razlikom u maksimalnoj dubini i visini površine [23].

Uočeno je proporcionalno smanjenje faktora trenja s laserskom obradom. Početni koeficijent trenja je iznosio između 0,46 i 0,48 da bi se nakon makro obrade te vrijednosti smanjile od 0,23 do 0,25 što se smatra povezanim s povećanjem visine površinskog reljefa te dolazi do manje kontaktne površine pri trenju. Mikro taljenje daljnje smanjuje koeficijent trenja između 0,11 i 0,12[23].



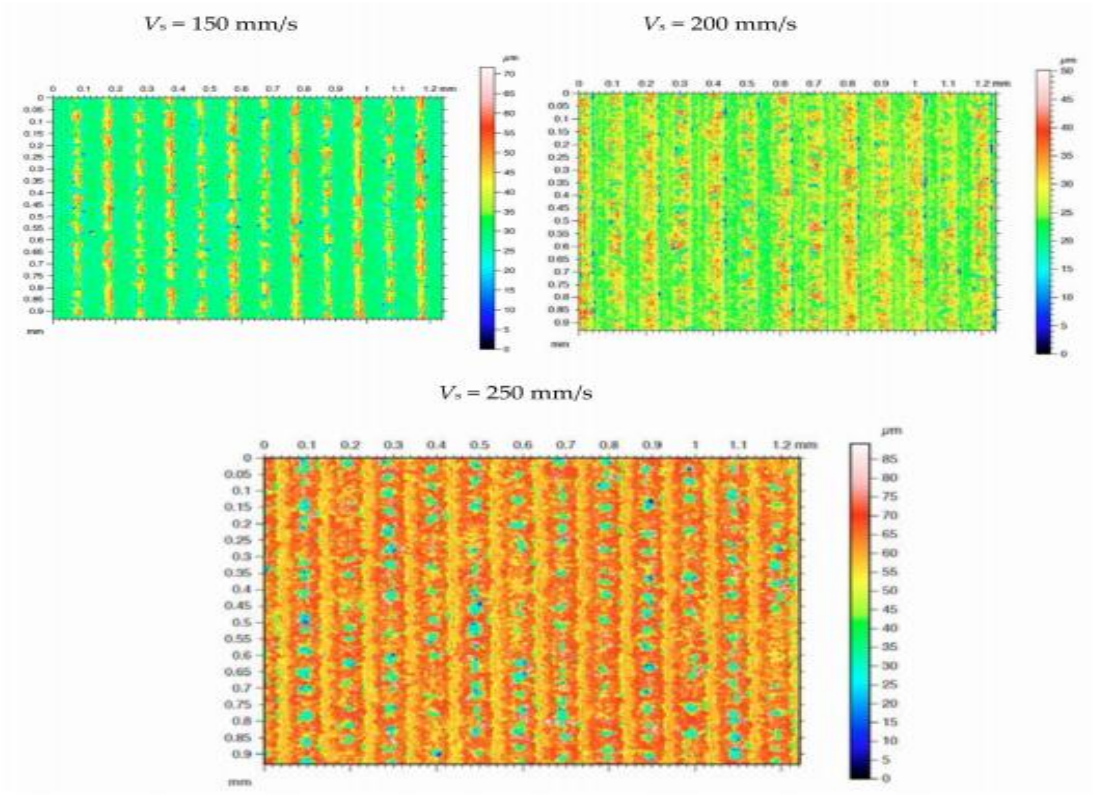
Slika 23. Morfologija: a) početna, b) mikrotaljenje, c) makrotaljenje [23]

6.3. Ovisnost kvašenja o brzini laserskog snopa

Analizom ponašanja parametara hrapavosti može se dobiti trend ponašanja površine materijala u kontekstu najviše visine profila i razmaka između vrhova profila. Povećanje brzine laserskog snopa rezultira smanjenjem dubine profila površine jer laserska zraka troši manje vremena na isti presjek materijala. Takvo ponašanje se može zaključiti iz smanjenja parametara R_z povećanjem brzine lasera [19].

Nadalje, pri brzinama laserske obrade većim od 150 mm/s odvija se značajno povećanje vrijednosti kontaktnog kuta. To je uzrokovano povećanjem kompaktnosti i uniformnosti obrađenog sloja kao što je prikazano na slici 24. Vidljivo je da pri povećanju brzine laserskog snopa s 200 mm/s na 250 mm/s dolazi do znatno manje taljenja materijala, manjih dubina brazda i samim time višeg profila površine [19].

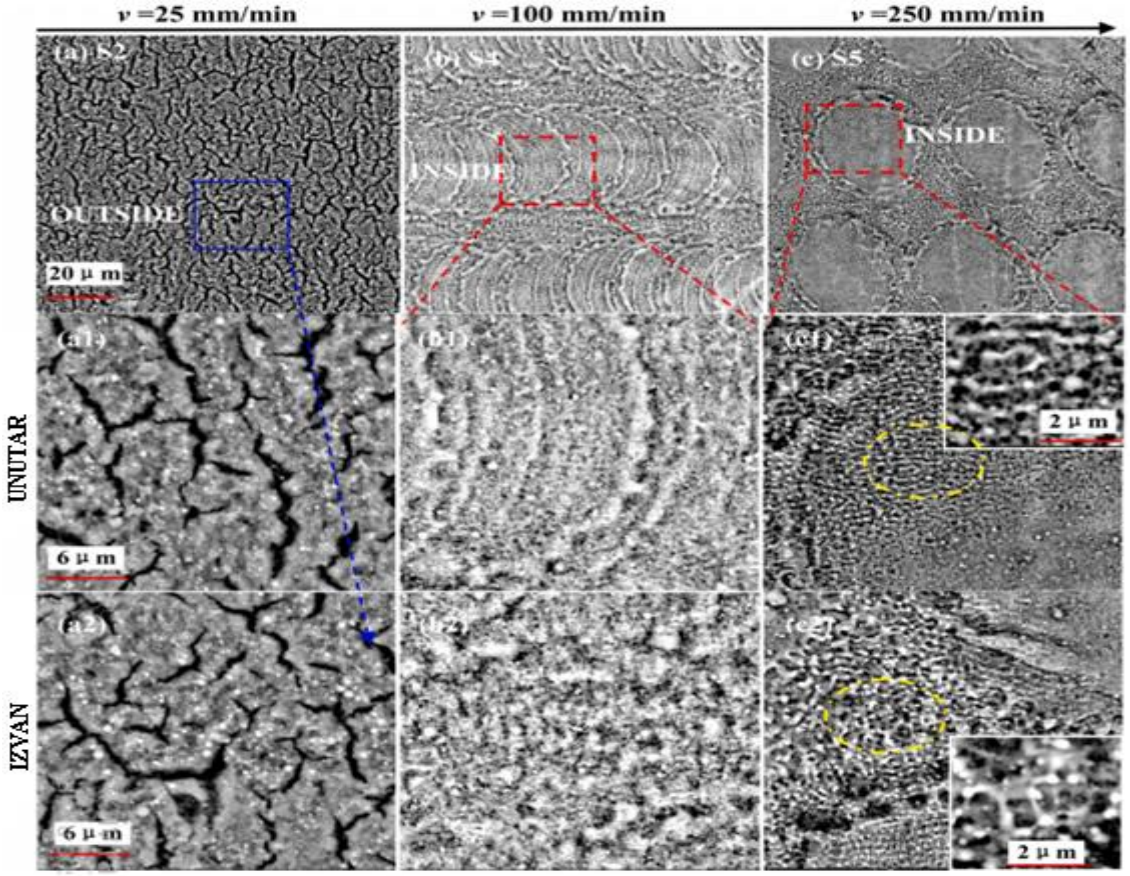
Povećanje brzine laserskog snopa rezultira razvojem tekstura s većom dodirnom površinom između krute i tekuće faze. Eksperimentalno je dokazano da će se maksimalni kut kvašenja od 146° postići za brzinu laserskog snopa od 250 mm/s. Pri manjim brzinama laserske obrade kut kvašenja je poprimio manje vrijednosti [19].



Slika 24. Ovisnost dubine teksturiranih tragova o brzini lasera [8]

Obradom površine laserskim snopom moguće je postići različite vrste topografija i samim time multifunkcionalne površine. Uz to je naravno moguće promijeniti i ostala svojstva, poput optičkih, triboloških, svojstava adhezije i kvašenja. Razni metalni materijali, poput bakra, aluminija, nehrđajućeg čelika i titanija su korišteni za pripremu superhidrofobnih ili superhidrofilnih površina laserskom obradom [24].

Obrada laserskim snopom ima nekoliko prednosti, prvenstveno jer je beskontaktna i primjenjiva na širok spektar materijala s malo ograničenja okoline obrade. Topografija nastala laserskom obradom ovisi o parametrima lasera. Na slici 25. su prikazane SEM snimke površine legure titanija tretirane različitim brzinama laserskog snopa [24].



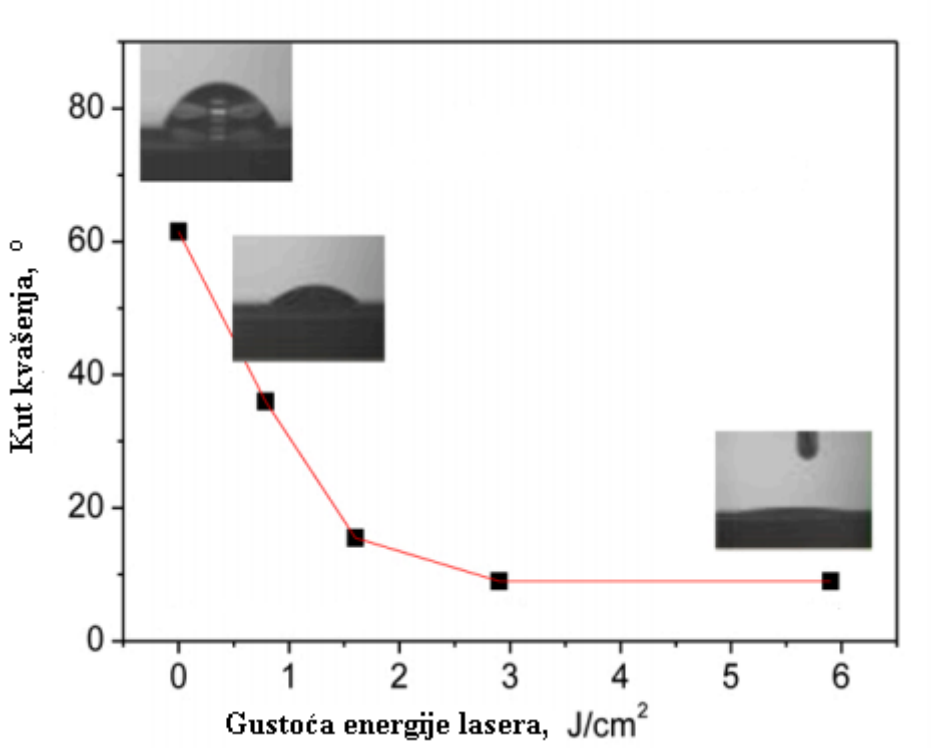
Slika 25. Topografija pri različitim brzinama obrade laserom [24]

Na slici 25. su prikazani i uvećani prikazi izvan i unutar linija obrade laserom. Brzine lasera su redom 25, 100 i 250 mm/min. Mikro pukotine na slici 25. b1) su posljedica pulsnog rada lasera. Pri manjim brzinama na slici 25. a) je nastala modificirana površina prekrivena strukturom manje valne duljine od tragova pulseva lasera. Ključnu ulogu u proizvodnji takve morfologije ima interferencija pulseva lasera. Pri većim brzinama interferencija je znatno manja i rjeđa pa dijelovi površine budu zahvaćeni s manjim brojem pulseva lasera [24].

6.4. Utjecaj gustoće energije laserskog snopa na kvašenje [25]

Kut kvašenja prije laserske obrade na uzorcima legure titanija je iznosio 61,5°. Izmjereni kutevi kvašenja nakon obrade laserskim snopom su se smanjili, što znači da je došlo do boljeg kvašenja [25].

Najhidrofilnije površine i kut kvašenja manji od 10° su postignuti za uzorke legure titanija obrađene najvećom gustoćom energije lasera. Postepeni pad kuta kvašenja pri povećanju energije lasera je prikazan na slici 26. [25]

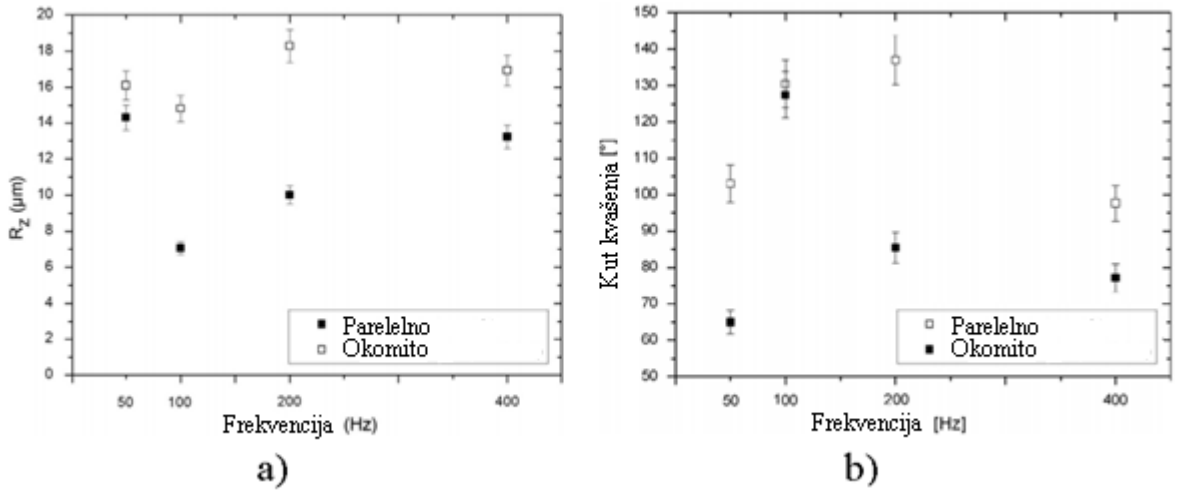


Slika 26. Kut kvašenja u ovisnosti o energiji lasera [25]

6.5. Ovisnost kvašenja o frekvenciji lasera [26]

U dentalnoj medicini često se koriste titanijevi implantati koji su relativno učinkoviti, ali još postoji mjesta za napredak u vidu navođenja interakcije kosti i implantata na mjestu usađivanja. Taj problem se pokušao riješiti modificiranjem površine laserskim snopom kako bi se postigla anizotropna svojstva kvašenja [26].

Parametar u ovisnosti o kojem je praćena promjena kuteva kvašenja jest frekvencija laserskog snopa. Na slici 27. je prikazan utjecaj frekvencije laserskog snopa na parametar hrapavosti R_z i kut kvašenja [26].



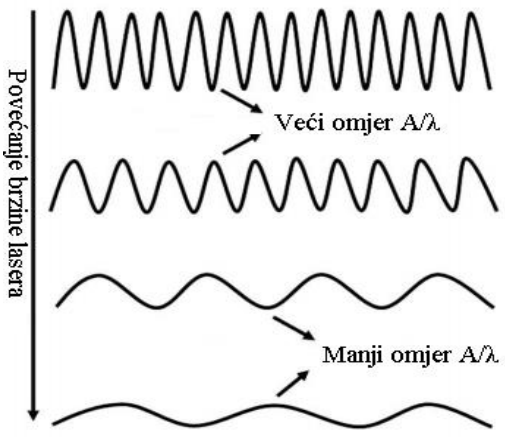
Slika 27. Utjecaj frekvencije lasera na a) parametar hrapavosti *Rz*, b) kut kvašenja [26]

Amplitudni parametar hrapavosti R_z i kut kvašenja su mjereni u dva smjera: paralelno uz smjer kretanja lasera i okomito na njega. Vidljivo je da dolazi do velikih razlika ovisno o smjeru mjerenja [26].

Anizotropnost svojstava se najbolje vidi na uzorku tretiranom laserskim snopom frekvencije 200 Hz. Do toga dolazi jer teksturirane linije utječu na kontakt kapljevine i krutine tako da se kapljice počnu širiti u smjeru linija obrađenih laserskim snopom. Ta pojava rezultira najvećim kutem kvašenja za uzorak tretiran frekvencijom laserskog snopa od 200 Hz. Daljnje povećanje frekvencije rezultira smanjenjem izotropnosti mjerenih svojstava [26].

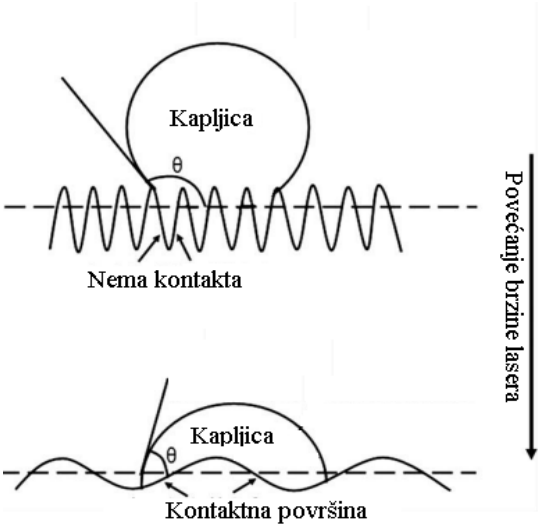
6.6. Ovisnost kvašenja o amplitudi i valnoj duljini oblika na površini [27]

Svaka vrsta obrade ostavlja specifične tragove na površini pa tako i laserska obrada. Kvašenje na nekoj površini će ovisiti upravo o veličini, dubini i rasporedu, odnosno o amplitudi i valnoj duljini tih tragova. A/λ je parametar oblika površine koji određuje omjer amplitude i valne duljine površinskih tragova. Povećanjem brzine lasera omjer A/λ će padati što je prikazano na slici 28 [27].



Slika 28. Omjer amplitude i valne duljine pri obradi laserom [27]

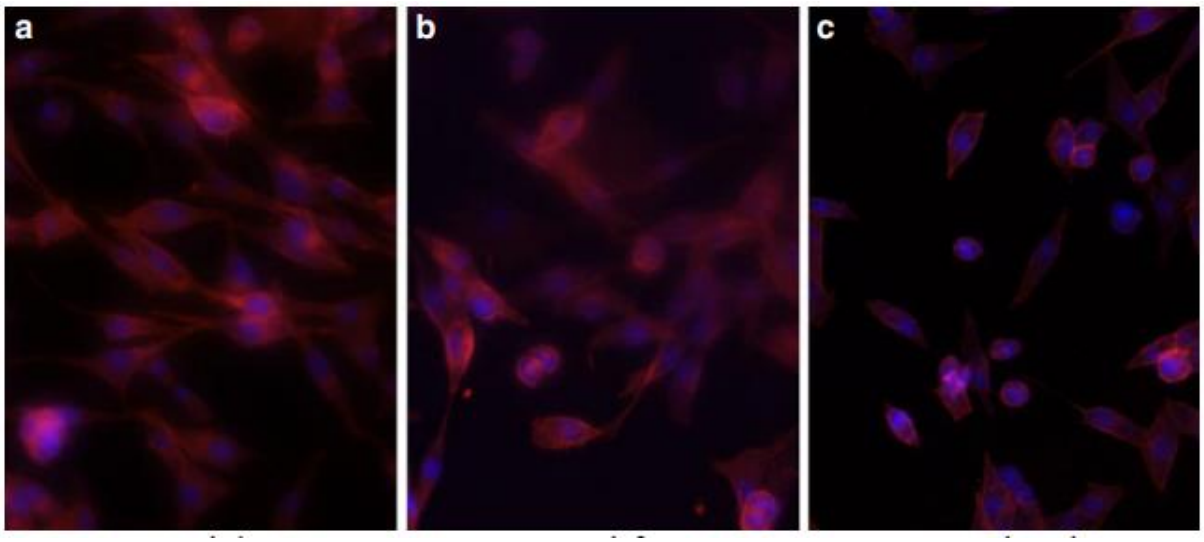
Povećanjem brzine lasera uz omjer A/λ će padati i kut kvašenja. Do toga dolazi zbog drugačije vrste kontakta kapljice i površine pri manjoj amplitudi i većoj valnoj duljini. Takav fenomen je prikazan na slici 29 [27].



Slika 29. Ponašanje kapljice pri različitim amplitudama i valnim duljinama [27]

6.7. Povećanje biokompatibilnosti legura titanija laserom [28]

Biokompatibilnost materijala za implantat ovisi o njegovim fizikalnim i mehaničkim svojstvima. Laserska obrada titanijeve legure Ti6Al4V se dokazala kao mogući način za poboljšanje biokompatibilnosti implantata preko svojstava površine. Laserska obrada na površini Ti6Al4V rezultira taljenjem metala i kad se metal skrutne mikrostruktura i parametri površine se mijenjaju. U studiji su mijenjani parametri laserske obrade kako bi se postigle geometrije različitih dubina i širina. Mijenjana je frekvencija laserske obrade i radni ciklus te je utvrđeno da utječu na promjene kvašenja na površini i adsorpciju stanica. Na različito obrađenim uzorcima uzgajane su umjetno dobivene stanice. Na slici 30. je prikazan rast tih stanica viđen svjetlosnim mikroskopom [28].



Slika 30. Rast stanica na površini titanija [28]

Uzorci a) i b) su tretirani laserom dok je uzorak c) netretiran. Rast stanica je praćen nakon 3 i 5 dana. Zaključeno je da pojave na površini obrađenih uzoraka s dimenzijama bližim onima stanicama pozitivno utječu na njihovo širenje [28].

7. EKSPERIMENTALNI DIO

Istraživanje je provedeno na 5 uzoraka titanijeve legure Ti6Al4V. Uzorci su jednako mehanički predobrađeni postupkom brušenja i poliranja. Uzorak 1 je referentni uzorak i on nije obrađen laserskom obradom. Na uzorcima 2, 3, 4 i 5 je napravljena i obrada laserom.

Dimenzije uzoraka su 17x17 mm s debljinom od 7 mm. Na uzorcima je zatim izmjerena hrapavost, analizirani su skenirajućim svjetlosnim mikroskopom te je izmjeren kut kvašenja.

7.1. Mehanička predobrada

Svi uzorci su mehanički predobrađeni brušenjem i poliranjem s brusnim papirom granulacije 4000 te dijamantnom pastom 0,3 mikrona. Priprema uzoraka napravljena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 31. su prikazani uzorci nakon obrade brušenjem i poliranjem.



Slika 31. Uzorci nakon mehaničke predobrade površine

7.2. Obrada laserom

Za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada uzorci 2, 3, 4 i 5 su podvrgnuti postupku laserske obrade na femtosekundnom laseru na Institutu za fiziku u Zagrebu. Korišteni su sljedeći parametri laserske obrade: snaga od 16mW, brzina laserskog snopa od 5 mm/s i 10 mm/s te jednostruki i dvostruki prolaz laserskog snopa. Parametri obrade za svaki uzorak su prikazani u tablici 2.

Radi lakšeg snalaženja kroz eksperimentalni dio rada uz imena će stajati i parametri njihove obrade: Uzorak 1, Uzorak 2-5-2, Uzorak 3-5-1, Uzorak 4-10-2, Uzorak 5-10-1. Prvi broj nakon broja uzorka označava brzinu laserske obrade, a drugi broj označava broj prolazaka laserskim snopom po površini uzorka.

Tablica 2. Parametri laserske obrade

Broj uzorka	P, [mW]	V,[m/s]	Broj prolaza
1	-	-	-
2-5-2	16	5	2
3-5-1	16	5	1
4-10-2	16	10	2
5-10-1	16	10	1

7.3. Hrapavost uzoraka

Parametri hrapavosti uzoraka mjereni su u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina na Zavodu za kvalitetu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na uređaju Perthometer S8P prikazanom na slici 32. Sva ispitivanja su obavljena u skladu s normama ISO 4287:1997, ISO 4288:1996 i ISO 3274:1996 [29, 30 ,31].



Slika 32. Uređaj za mjerenje hrapavosti Perthometer S8P

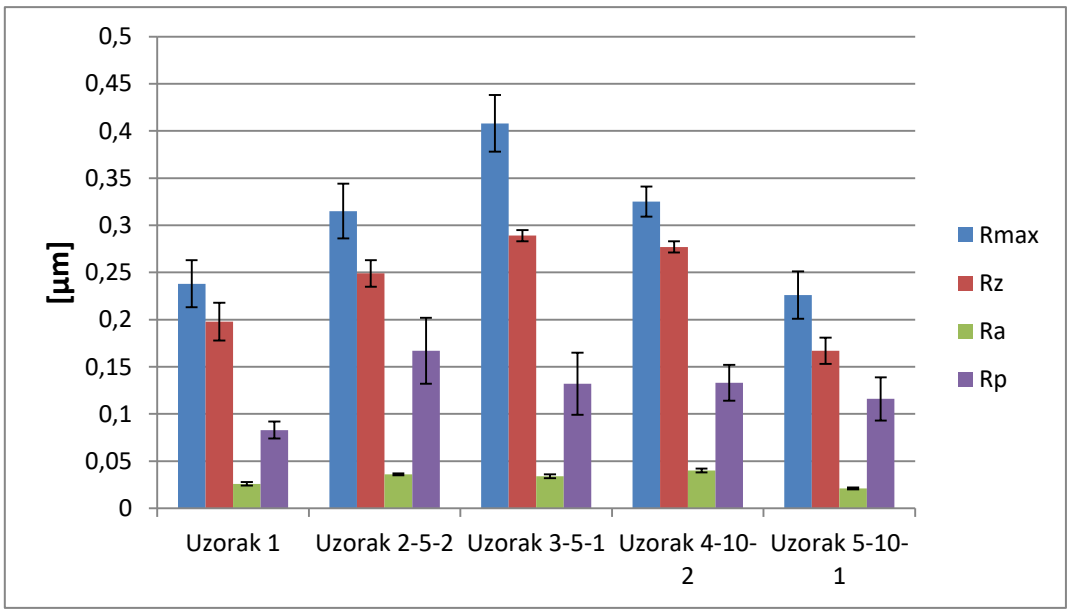
Uvjeti mjerenja dobiveni iz Laboratorija za precizna mjerenja duljina za uređaj Perthometer S8P glase:

- Gaussov filter, granična vrijednost *l*c = 0,25 mm
- Vođenje nožicom
- Radijus ticala *r* = 5 µm
- Duljina ocjenjivanja *ln* = 1,25 mm
- Mjerna sila: *F* = 1,3 mN

U tablici 3 su prikazani rezultati mjerenja hrapavosti uzoraka, a na slici 33. ti isti rezultati su prikazani grafički.

Tablica 3. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti uzoraka

Broj uzorka	$\bar{x}$, [µm]			
	R_{max}	R_z	R_a	R_p
1	**0,238±0,055**	**0,198±0,012**	**0,026±0,002**	**0,083±0,009**
2-5-2	**0,315±0,059**	**0,249±0,024**	**0,036±0,001**	**0,167±0,065**
3-5-1	**0,408±0,07**	**0,289±0,016**	**0,034±0,002**	**0,132±0,073**
4-10-2	**0,325±0,026**	**0,277±0,016**	**0,040±0,002**	**0,133±0,019**
5-10-1	**0,226±0,045**	**0,167±0,024**	**0,021±0,001**	**0,116±0,053**

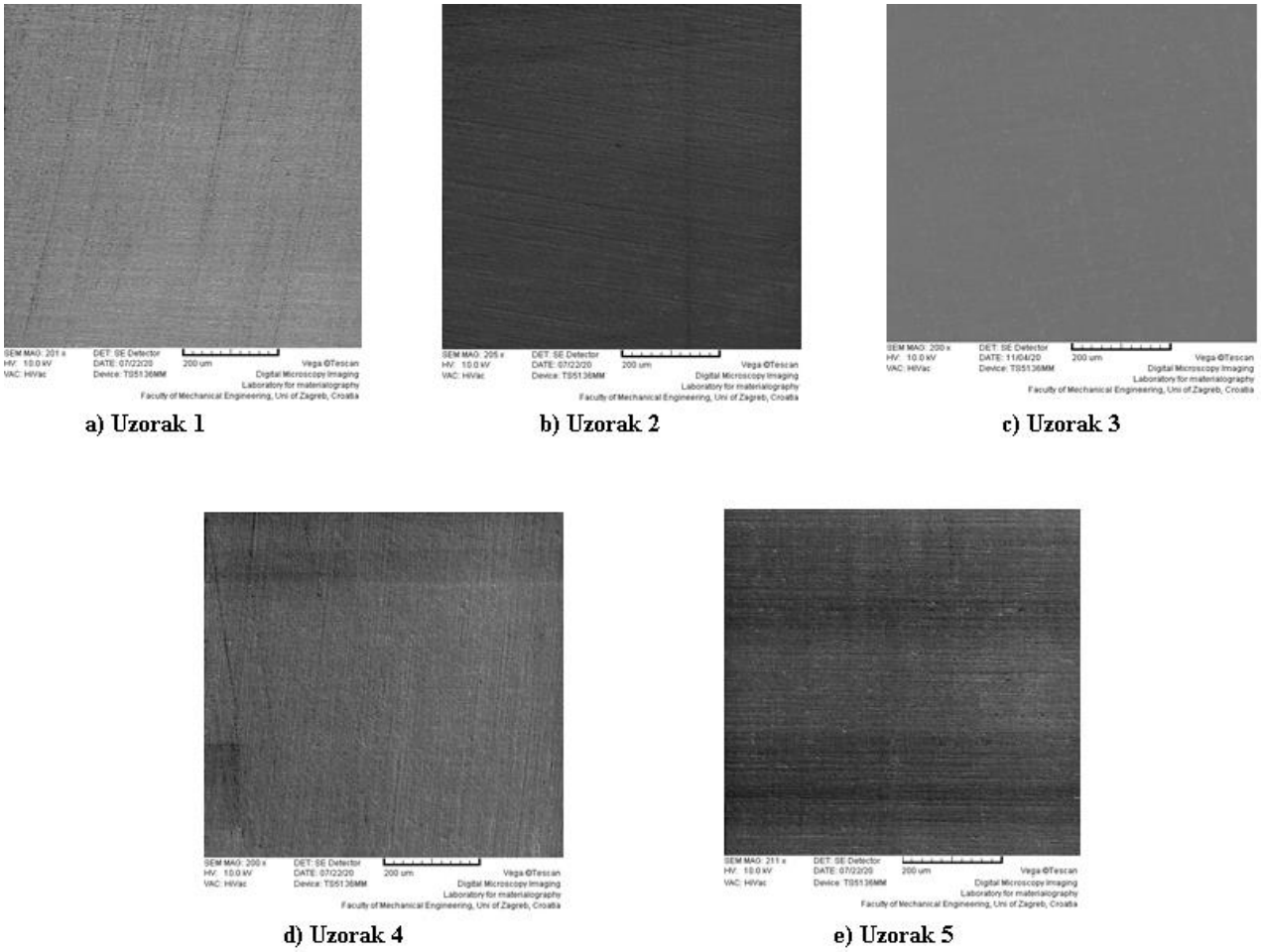


Slika 33. Grafički prikaz rezultata hrapavosti

Najmanje vrijednosti parametara hrapavosti nakon laserske obrade te one najsličnije referentnom uzorku pokazuje uzorak 5-10-1. Uzorak 3-5-1 ima najizraženije vrhove na profilu što je vidljivo preko parametra R_{max} koji predstavlja visinu najvišeg vrha na duljini vrednovanja. Uzorci 2-5-2 i 4-10-2 imaju slične vrijednosti parametara hrapavosti, ali se njihovi profili hrapavosti uvelike razlikuju (Prilog, slika 41 i slika 43).

7.4. SEM Analiza

Mikrostrukturna analiza površina uzoraka provedena je u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Primijenjena je elektronska mikroskopija na skenirajućem elektronskom mikroskopu TESCAN VEGA 5136MM. Na slici 34. su prikazane su prikazane SEM snimke površina različito obrađenih uzoraka.



Slika 34. SEM snimke uzoraka: a) Uzorak 1, b) Uzorak 2-5-2, c) Uzorak 3-5-1, d) Uzorak 4-10-2, e) Uzorak 5-10-1

Slika 34. prikazuje SEM snimke uzoraka pod povećanjem od 200x pod kojim se vidi površina uzoraka nakon obrade brušenjem, poliranjem i laserom.

Na laserski obrađenim uzorcima jasno je vidljiv smjer kretanja lasera po nastalim linijama. Uzorci obrađeni dvostrukim laserskim snopom posjeduju gušće linije i teksture zbog preklapanja u prolazu laserske zrake.

8. MJERENJE I ANALIZA KUTA KVAŠENJA

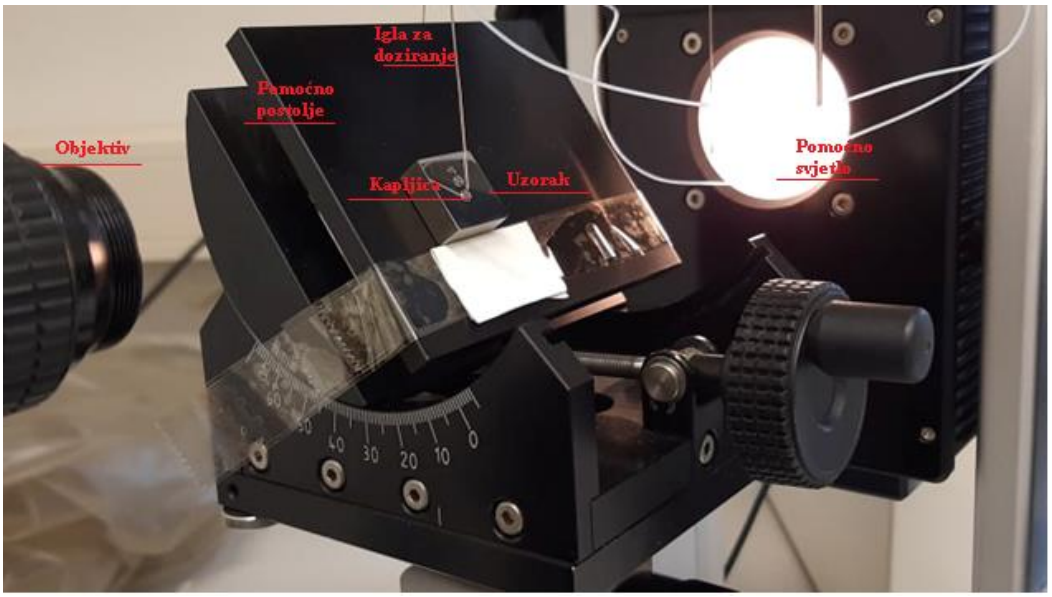
8.1. Mjerenje kuta kvašenja

Ispitivanje kuta kvašenja je provedeno na Zavodu za inženjerstvo površina polimernih materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu. Postupak je proveden tako da su uzorci prvo očišćeni ultrazvučnom kupkom u alkoholu kako bi se s njih uklonile sve nečistoće. Zatim su pažljivo osušeni i stavljeni na postolje za mjerenje kuta kvašenja na goniometru Dataphysics Contact Angle System OCA koji je prikazan na slici 35.



Slika 35. Goniometar Dataphysics Contact Angle System OCA

Kut kvašenja je očitan na stoliću pri 0° nakon 20 i nakon 60 sekundi na 5 uzoraka. Mjerenja su ponovljena 10 puta i izračunate su aritmetičke sredine kako bi podaci dali reprezentativnu sliku stanja na površini. Isti postupak je ponovljen za kuteve nagiba od 30° i 60° koji su postignuti pomoću postolja prikazanog na slici 36.



Slika 36. Proces mjerenja kuta kvašenja

Slika 36 prikazuje glavne dijelove goniometra: objektiv optičkog uređaja, pomoćno postolje, iglu sustava za doziranje te pomoćno svjetlo. Za mjerenja kuta kvašenja pri nagibu od 30° i 60° uzorke je bilo potrebno osigurati kako bi bili stacionarni.

8.2. Rezultati kuta kvašenja

Početak svakog mjerenja kuta kvašenja jest namještanje optičkog uređaja u svrhu dobivanja čiste slike uzorka. Zatim slijedi doziranje kapljice te podešavanje parametara u programskom paketu goniometra. Iz zadanih parametara pomoću referentne linije računalo računa kut kvašenja CA(M) (Contact Angle Medium) u stupnjevima za svaku kapljicu. Rezultati mjerenja kuteva kvašenja pri 0°, 30° i 60° nakon 20 i 60 sekundi prikazani su u tablicama 4, 5 i 6.

Tablica 4. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri 0°

Nagib: 0°	**Uzorak 1**		**Uzorak 2-5-2**		**Uzorak 3-5-1**		**Uzorak 4-10-2**		**Uzorak 5-10-1**	
Br. mjerenja	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**
1.	71,95	66,38	64,69	62,25	73,36	69,84	70,51	67,00	77,03	74,39
2.	63,24	58,43	66,96	61,89	74,53	70,51	73,05	69,37	68,66	64,63
3.	60,57	57,50	65,28	62,59	66,65	63,85	78,68	74,47	73,42	71,35
4.	65,11	62,50	68,86	63,28	77,27	73,36	77,22	73,05	75,99	73,82
5.	58,22	55,04	68,43	65,45	71,02	67,60	68,45	66,25	76,28	74,06
6.	60,64	55,97	67,75	65,34	78,19	74,38	76,67	73,37	74,53	72,21
7.	62,69	59,54	65,05	61,66	69,38	67,56	75,49	70,42	72,87	70,57
8.	63,24	58,43	65,27	60,21	79,69	76,88	69,37	66,78	70,83	67,44
9.	66,54	61,91	69,35	66,15	78,21	75,45	78,01	74,50	74,35	71,47
10.	65,15	61,88	67,29	63,69	69,84	66,02	71,35	68,90	73,75	72,17
Srednja vrijednost CA(M), [°]	**63,74**	**59,76**	**66,89**	**63,25**	**73,81**	**70,54**	**73,88**	**70,41**	**73,77**	**71,21**

Referentni uzorak, odnosno uzorak 1. koji nije obrađen laserom je nakon 20 sekundi imao srednju vrijednost kuta kvašenja od 63,74°. Uzorak 4-10-2 je imao najveću vrijednost kuta kvašenja nakon 20 sekundi od 73,88°. U odnosu na referentni uzorak kut kvašenja je nakon 20 sekundi porastao na svim uzorcima.

Nakon 60 sekundi na svim uzorcima vrijednost kuta kvašenja pada u odnosu na kut kvašenja nakon 20 sekundi. Do toga dolazi zbog uspostavljanja ravnoteže u kontaktu kapljice i krutine, dinamike unutar same kapljevine i isparavanja. U odnosu na bazni uzorak, kut kvašenja je porastao na laserski obrađenim uzorcima. Nakon 60 sekundi najveći kut kvašenja je na uzorku 5-10-1.

Tablica 5. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri nagibu od 30°

Nagib: 30°	**Uzorak 1**		**Uzorak 2-5-2**		**Uzorak 3-5-1**		**Uzorak 4-10-2**		**Uzorak 5-10-1**	
Br. mjerenja	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**
1.	79,14	75,52	68,73	65,05	66,22	63,68	79,41	76,46	75,66	68,15
2.	79,74	74,19	66,06	64,07	73,55	71,41	77,19	74,64	78,21	75,66
3.	82,17	79,32	62,79	60,34	74,57	67,63	76,41	74,13	72,78	67,65
4.	83,53	81,68	64,07	61,66	78,27	74,08	71,80	68,17	68,68	66,74
5.	80,34	76,88	65,01	61,09	72,68	69,71	73,18	68,24	75,05	67,41
6.	63,30	54,03	63,90	63,22	74,08	69,91	78,78	75,95	70,59	66,98
7.	73,34	68,75	66,17	63,42	77,18	72,98	72,76	69,87	68,58	63,57
8.	67,81	64,12	66,81	63,18	76,54	73,88	75,05	70,72	69,67	67,10
9.	61,89	56,89	64,09	62,11	78,72	73,54	77,42	75,42	70,54	67,54
10.	63,78	60,43	63,36	60,03	82,25	76,54	72,21	67,91	66,80	61,71
Srednja vrijednost CA(M), [°]	**73,50**	**69,18**	**65,10**	**62,42**	**75,41**	**71,34**	**75,42**	**72,15**	**71,66**	**67,25**

Pri nagibu od 30° razlika kuteva kvašenja nakon 20 sekundi i nakon 60 sekundi je veća nego pri 0°. Na uzorku 4-10-2 je očitan maksimalni kut kvašenja od 75,42° nakon 20 sekundi i 72,15° nakon 60 sekundi. Pri nagibu od 30° srednja vrijednost kuta kvašenja na uzorcima 2-5-2 i 5-10-1 smanjila u odnosu na ostale uzorke.

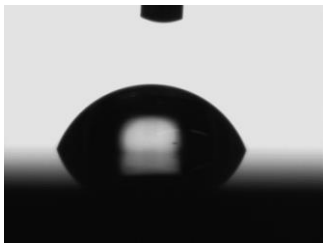
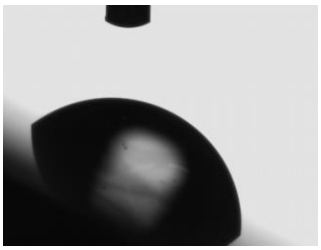
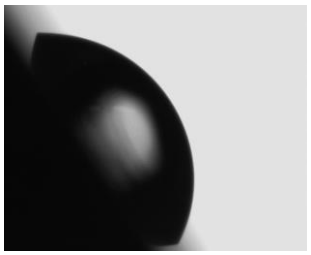
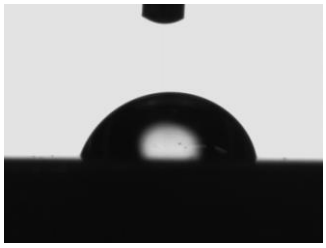
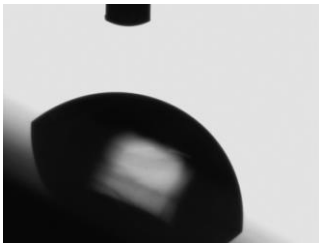
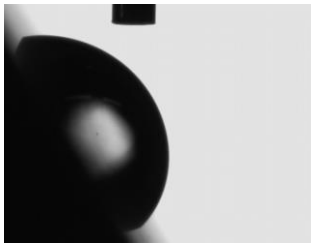
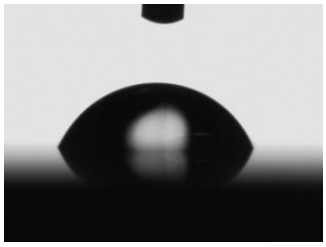
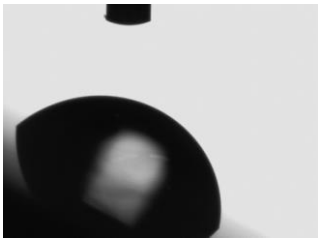
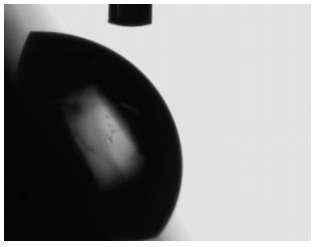
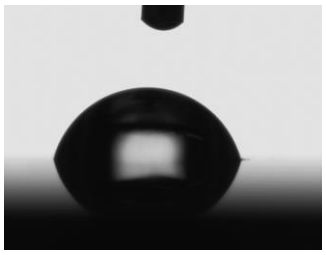
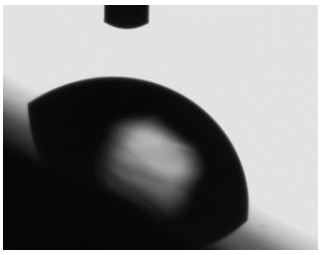
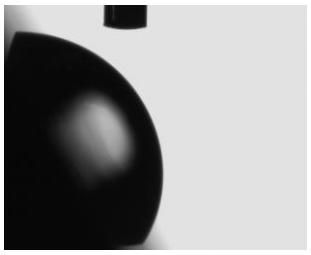
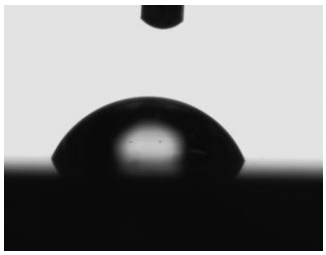
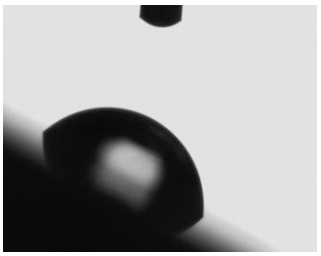
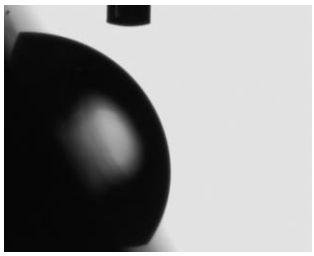
Tablica 6. Rezultati mjerenja kuta kvašenja CA(M), [°]nakon 20 i 60 sekundi pri nagibu od 60°

Nagib: 60°	**Uzorak 1**		**Uzorak 2-5-2**		**Uzorak 3-5-1**		**Uzorak 4-10-2**		**Uzorak 5-10-1**	
Br. mjerenja	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**	**20 s**	**60 s**
1.	67,25	64,88	63,12	60,17	68,11	63,74	74,18	71,07	63,54	61,43
2.	65,68	63,94	59,83	58,64	71,41	68,48	69,06	65,00	62,42	59,69
3.	64,48	62,33	61,49	57,88	64,88	63,82	70,31	67,66	61,79	60,75
4.	72,58	68,25	61,17	60,37	70,56	69,02	68,85	67,09	63,34	57,03
5.	67,58	62,49	58,21	57,52	69,58	67,68	69,15	66,99	62,10	59,83
6.	74,32	71,34	63,52	62,61	71,73	69,79	70,75	68,37	64,16	61,17
7.	65,67	61,53	59,87	58,83	70,06	68,07	68,41	66,66	63,13	60,01
8.	72,68	76,35	62,84	61,55	72,34	69,39	69,81	68,08	62,52	59,26
9.	76,35	72,48	61,69	60,58	68,98	67,77	69,28	67,65	61,38	59,69
10.	68,95	66,33	61,17	60,37	73,83	72,80	67,08	64,91	62,21	59,80
Srednja vrijednost CA(M), [°]	**69,55**	**66,99**	**61,29**	**59,85**	**70,15**	**68,06**	**69,69**	**67,35**	**62,66**	**59,86**

Pri nagibu od 60° najveći kut kvašenja je na uzorku 3-5-1, a iznosi 70,15° nakon 20 sekundi i 68,06° nakon 60 sekundi. S druge strane, kvašenje je najbolje na uzorku 2-5-2 koji zadržava najmanji kut kvašenja od 61,29° nakon 20 sekundi.

Srednja vrijednost kuta kvašenja se smanjila na svim uzorcima u odnosu na nagib od 30°. Slike mjerenja kuteva kvašenja pri nagibu od 0°, 30° i 60° su prikazane u tablici 7.

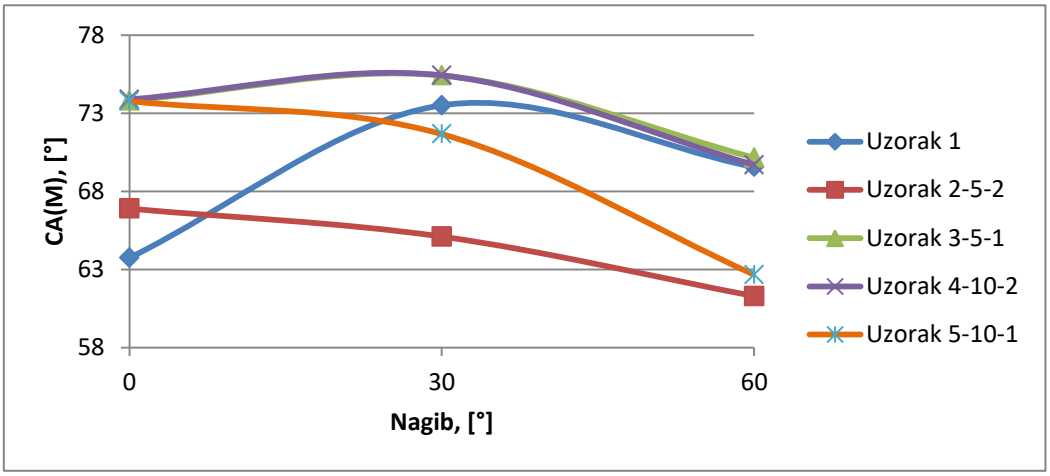
Tablica 7. Slike kuteva kvašenja nakon 60 sekundi

Broj uzorka	Nagib: 0°	Nagib: 30°	Nagib: 60°
1			
2-5-2			
3-5-1			
4-10-2			
5-10-1			

U tablici 8. dane su srednje vrijednosti svih kuteva kvašenja nakon 20 sekundi te je za svaki uzorak izračunata prosječna vrijednost kako bi se moglo usporediti kvašenje na različito obrađenim uzorcima. Na slici 37. te vrijednosti su prikazane grafički.

Tablica 8. Srednje vrijednosti kuteva kvašenja CA(M),[°] nakon 20 sekundi

Broj uzorka	1	2-5-2	3-5-1	4-10-2	5-10-1
Nagib od 0°	63,74±3,62	66,89±1,63	73,81±4,24	73,88±3,60	73,77±2,42
Nagib od 30°	73,50±8,12	65,10±1,73	75,41±4,10	75,42±2,66	71,66±3,46
Nagib od 60°	69,55±3,92	61,29±1,57	70,15±2,37	69,69±1,78	62,66±0,82



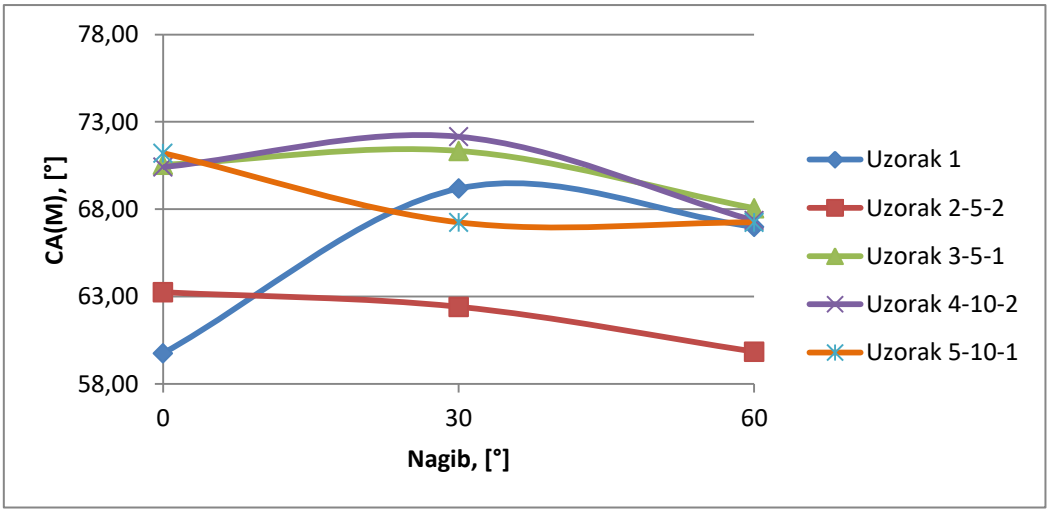
Slika 37. Grafički prikaz srednjih vrijednosti kuteva kvašenja nakon 20 sekundi

Vidljivo je da je u prosjeku nakon 20 sekundi kut kvašenja najmanji na uzorku 2-5-2. Manja brzina prolaza lasera rezultira time da laser provede više vremena na svakom dijelu površine i istopi više materijala. Uzorci 3-5-1 i 4-10-2 pri svim nagibima imaju vrlo slična svojstva kvašenja. To je najbolje vidljivo na slici 41. u kojoj se predviđene krivulje ponašanja kvašenja uzoraka 3-5-1 i 4-10-2 gotovo preklapaju.

U tablici 9. prikazane su srednje vrijednosti kuteva kvašenja nakon 60 sekundi pri nagibima od 0°, 30° i 60°. Na slici 38. te iste vrijednosti su prikazane grafički.

Tablica 9. Srednje vrijednosti kuteva kvašenja CA(M),[°] nakon 60 sekundi

Broj uzorka	1	2-5-2	3-5-1	4-10-2	5-10-1
Nagib od 0°	59,76±3,25	63,25±1,81	70,54±4,13	70,41±3,07	71,21±2,91
Nagib od 30°	69,18±9,31	62,42±1,56	71,34±3,55	72,15±3,32	67,25±3,41
Nagib od 60°	66,99±4,73	59,85±1,53	68,06±2,55	67,35±1,67	59,86±1,16

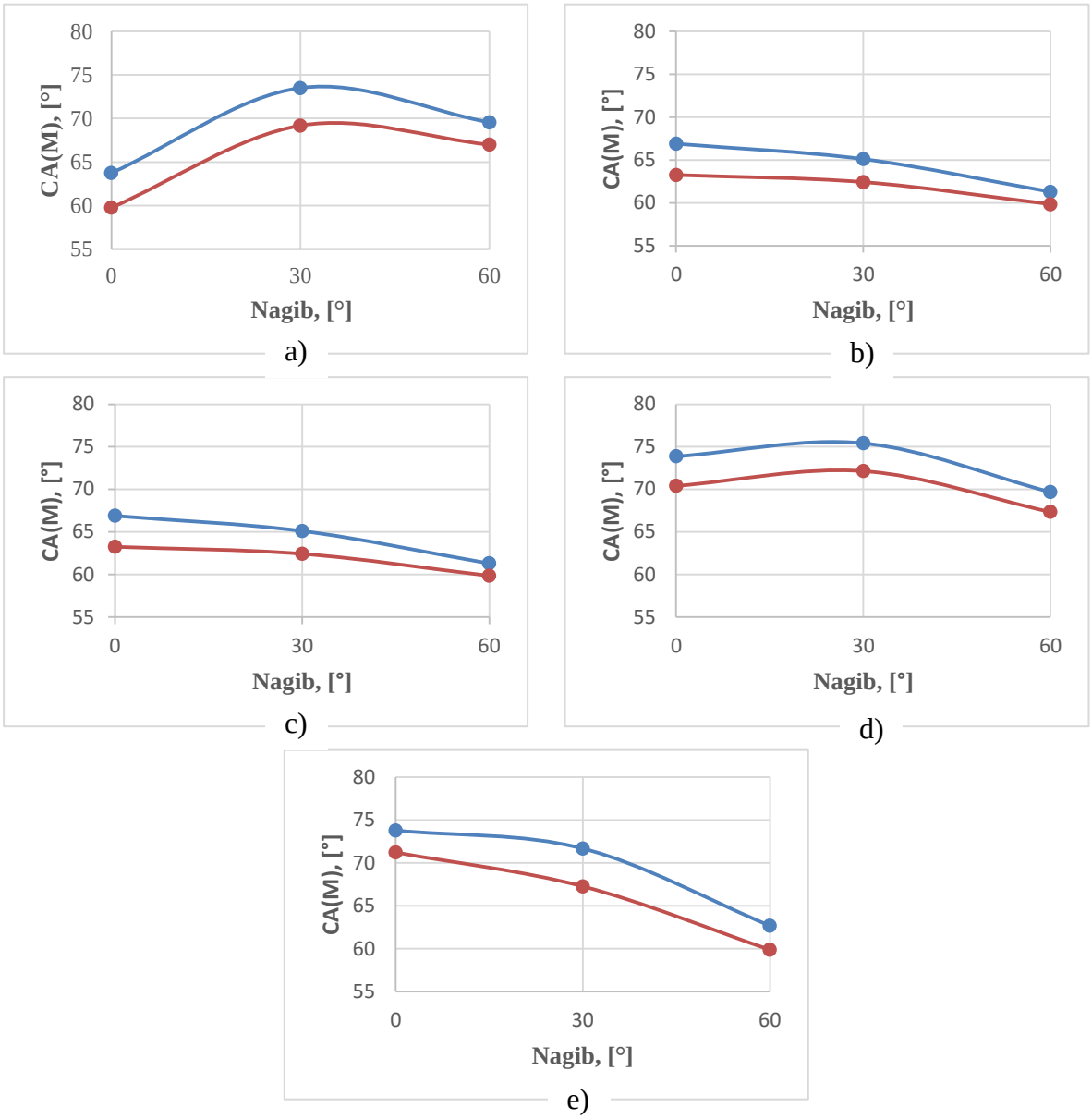


Slika 38. Grafički prikaz srednjih vrijednosti kuteva kvašenja nakon 60 sekundi

Nakon 60 sekundi uzorak 2-5-2 zadržava najmanje srednje vrijednosti kvašenja. Kutevi kvašenja i raspored po nagibima na uzorcima 3-5-1 i 4-10-2 su vrlo slični što se poklapa sa stanjem nakon 20 sekundi. Uzorak 1 nakon 20 i nakon 60 sekundi pokazuje maksimalnu vrijednost kuta kvašenja pri nagibu od 30°.

8.3. Histereza kuta kvašenja

U ovom radu je mjeren kut kvašenja nakon 20 i nakon 60 sekundi na različito obrađenim uzorcima pri različitim nagibima. Razlika između kuta kvašenja nakon 20 sekundi i nakon 60 sekundi, odnosno histereza, svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 39.



Slika 39. Grafički prikaz histereze za a) Uzorak 1, b) Uzorak 2-5-2, c) Uzorak 3-5-1, d) Uzorak 4-10-2, e) Uzorak 5-10-1

Uzorak 2-5-2 ima najmanju histerezu odnosno na njemu dolazi do najmanje promjene kuta kvašenja između 20 i 60 sekundi. S druge strane uzorak 1 koji nije laserski obrađen ima najveću promjenu kuta kvašenja. To može ukazivati da na laserski obrađenim uzorcima dolazi do stabilnijeg spoja u kontaktu kapljice i površine [12].

Grafički prikaz pokazuje da je na većini uzoraka histereza kuta kvašenja najveća pri kutu od 30°. Uzorci 2-5-2 i 4-10-2, obrađeni dvostrukim prolazom laserskim snopom histereza je obrnuto proporcionalna nagibu sustava. Što je manji nagib razlika u kutu kvašenja nakon 20 i 60 sekundi će biti veća.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu su ispitana svojstva kvašenja, hrapavost i topografija površine legure titanija Ti6Al4V. Ispitivanje se provodilo na 5 uzoraka, a kut kvašenja je mjeren na uzorcima nakon 20 i 60 sekundi pri nagibima od 0°, 30° i 60°.

Provedenim ispitivanjima utvrđeno je da:

- Uzorak obrađen jednim prolazom laserskog snopa i brzinom 10 mm/s pokazuje najmanje promjene vrijednosti parametara hrapavosti u odnosu na referentni uzorak zbog smanjenog djelovanja energije snopa na površinu.
- Najmanji kut kvašenja je postignut na uzorku s najmanjom brzinom i dvostrukim prolazom lasera. Zbog sporijeg dvostrukog prolaska laserske zrake na tom uzorku je došlo do najvećeg unosa energije i taljenja materijala.
- Razlika kuta kvašenja nakon 20 i 60 sekundi, odnosno histereza se smanjila na svim uzorcima nakon laserske obrade što može ukazivati da na laserski obrađenim uzorcima dolazi do stabilnijeg spoja u kontaktu kapljice i površine.

LITERATURA

[1] https://matmatch.com/blog/titanium-for-biomedical-and-dental-applications/ (dostupno 6.12.2020.)

[2] https://www.hefusa.net/pvd_coating/certess-Ti-titanium-nitride-PVD-coating.html (dostupno 6.12.2020.)

[3] https://www.kruss-scientific.com/services/education-theory/glossary/contact-angle/ (dostupno 1.12.2020.)

[4] Žitinski Elias P.; Novi pristup razmatranju funkcionalnih svojstava otopina za vlaženje; Diplomski rad , 2010

[5] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_droplet_lying_on_a_damask.jpg (dostupno 8.1.2020.)

[6] Kwok D. Y., Neumann A. W.; Contact angle measurement and contact angle interpretation.; Advances in Colloid and Interface Science, 1999

[7] Rudawska, A.; Assessment of surface preparation for the bonding/adhesive technology; Surface Treatment in Bonding Technology, 2019

[8] Kumić I.; Novi postupak difuzijskoga modificiranja površina titanove legure za endoprotetske implantate; Doktorska disertacija, 2016

[9] H. B. Eral, D.'t Mannetje & J. M. Oh; Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications; Colloid and Polymer Science , 2012

[10] T. Pratap, K. Patra; Mechanical micro-texturing of Ti-6Al-4V surfaces for improved wettability and bio-tribological performances; Surface and Coatings Technology, 2017

[11] http://www.lassp.cornell.edu/sethna/hysteresis/WhatIsHysteresis.html (dostupno 8.12.2020)

[12] Gao L., McCarthy, T. J.; Contact Angle Hysteresis Explained; Langmuirdoi, 2006

[13] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf (dostupno 15.12.2020)

[14] N. Tekçe, S. Fidan, S. Tuncer, D. Kara, M. Demirci; The effect of glazing and aging on the surface properties of CAD/CAM resin blocks; The Journal of Advanced Prosthodontics, 2018

[15] Rudawska, A.; Assessment of surface preparation for the bonding/adhesive technology; Surface Treatment in Bonding Technology, 2019

[16] Ćorić D.; Svojstva i primjena titana i njegovih legura; Zavarivanje, 2017

[17] Maršal D.; Laseri i njihova primjena, Završni rad, 2019

[18] https://www.testandmeasurementtips.com/basics-lasers-part-two/ (dostupno 3.1.2021)

[19] Vazquez-Martinez J.M., Salguero Gomez J.,Mayuet Ares P.F.,Fernandez-Vidal S.R., Batista Ponce M.; Effects of Laser Microtexturing on the Wetting Behavior of Ti6Al4V Alloy; Coatings, 2018

[20] Petrak A.; Utjecaj parametara laserskog graviranja na promjenu hrapavosti Ti-legura, Diplomski rad, 2019

[21] Wang, Y., Yu, Z., Li, K., & Hu, J.; Effects of surface properties of titanium alloys modified by grinding, sandblasting and acidizing and nanosecond laser on cell proliferation and cytoskeleton; Applied Surface Science, 2020

[22] L.M. Vilhena, B. Podgornik, J. Vižintin, J. Možina; Influence of texturing parameters and contact conditions on tribological behaviour of laser textured surfaces; Meccanica, 2010

[23] Ovchinnikov V., Luk'yanenko E.,Yakutina S.; The effect of laser irradiation of the surface of VT6 titanium alloy on its microstructure, roughness and friction coefficient; Materials Today: Proceedings, 2020

[24] Dou, H., Liu, H., Xu, S., Chen, Y., Miao, X., Lü, H., Jiang, X.; Influence of laser fluences and scan speeds on the morphologies and wetting properties of titanium alloy; Optik, 2020

[25] Dou, H., Liu, H., Xu, S., Chen, Y., Miao, X., Lü, H., Jiang, X.; Influence of laser fluences and scan speeds on the morphologies and wetting properties of titanium alloy; Optik, 2020

[26] A. May, N. Agarwala, J.Lee, M. Lambert, C.K. Akkana, F.P. Nothdurft, O.C. Aktas; Laser induced anisotropic wetting on Ti–6Al–4V surfaces; Materials Letters, 2015

[27] Paital, S. R., Dahotre, N. B.; Wettability and kinetics of hydroxyapatite precipitation on a laser-textured Ca–P bioceramic coating; Acta Biomaterialia, 2009

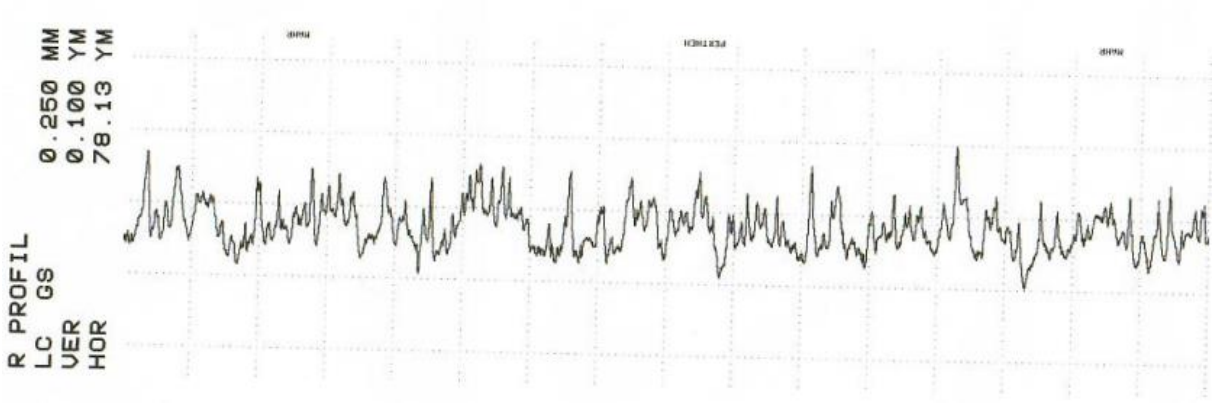
[28] Mukherjee S., Dhara S., Saha P.; Enhancing the biocompatibility of Ti6Al4V implants by laser surface microtexturing: an in vitro study; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013

[29] ISO 4287:1997 Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Terms, definitions and surface texture parameters

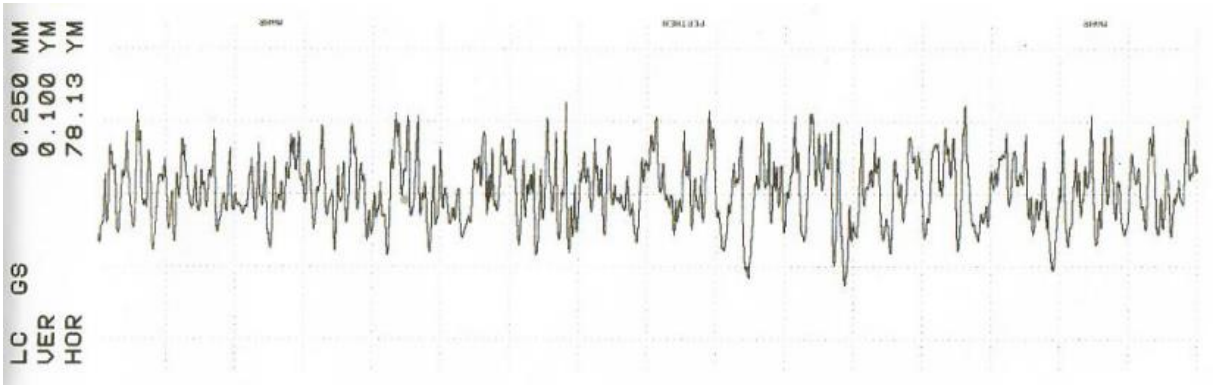
[30] ISO 4288:1996 Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture

[31] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surfacetexture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instrument

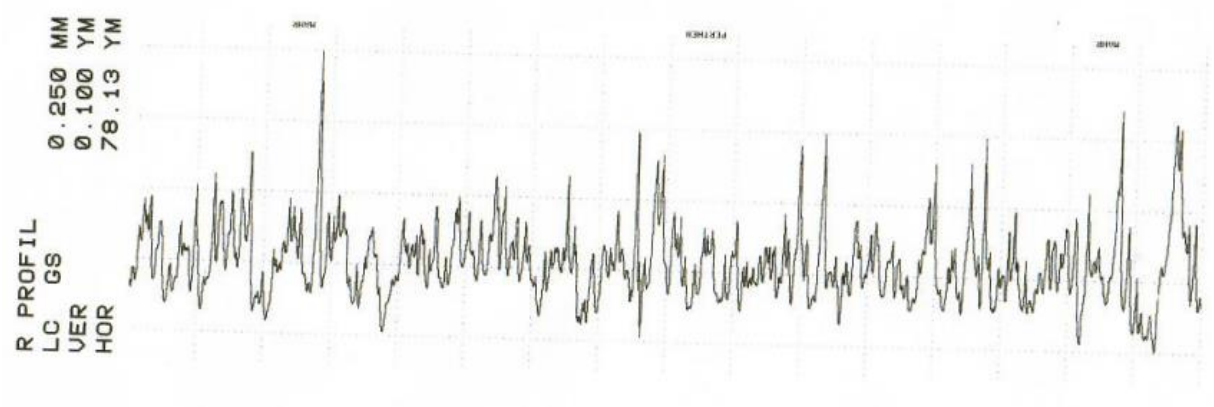
PRILOZI



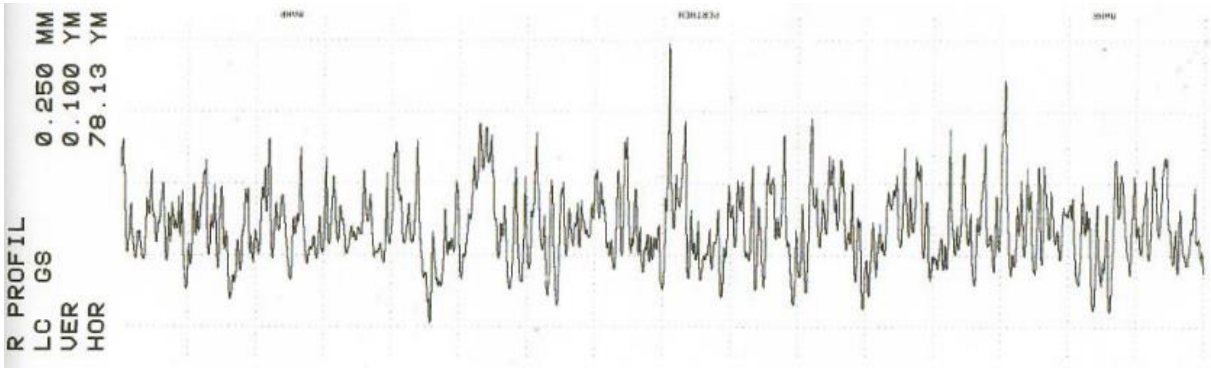
Slika 40. Profil hrapavosti uzorka 1



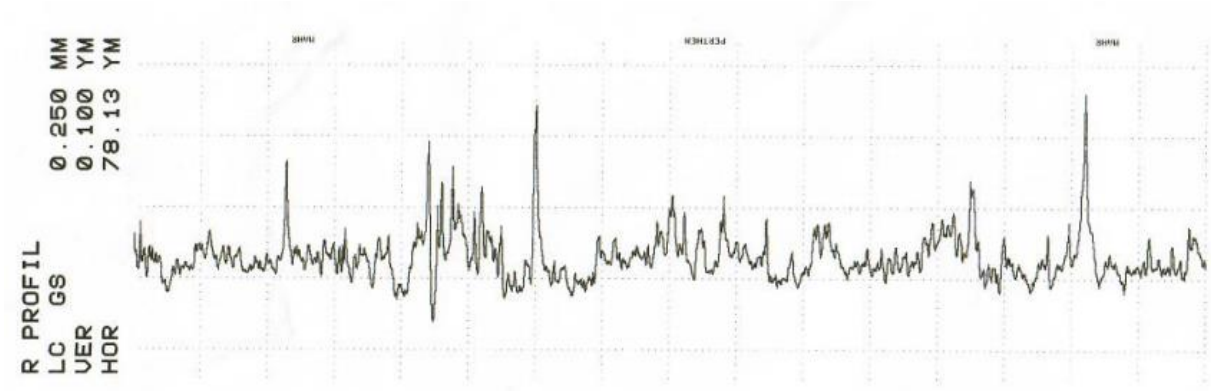
Slika 41. Profil hrapavosti uzorka 2-5-2



Slika 42. Profil hrapavosti uzorka 3-5-1



Slika 43. Profil hrapavosti uzorka 4-10-2



Slika 44. Profil hrapavosti uzorka 5-10-1