Utjecaj parametara elektrokemijskog nagrizanja na promjenu hrapavosti površine Ti legura

Štefan, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:444486

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Štefan

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing. Martin Štefan

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na dodijeljenoj temi, strpljenju i savjetima koji su ovaj rad učinili mogućim.

Veliko hvala asistentu Draženu Mezdiću koji je koordinirao svim aspektima eksperimentalnog dijela kako bi kvalitetno i u što kraćem roku dobili rezultate.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na pruženoj pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori tijekom studiranja.

Martin Štefan

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martin Štefan** Mat. br.: 0035207651

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara elektrokemijskog nagrizanja na promjenu hrapavosti površine Ti legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of eletrochemical etching parameters on the roughness changes of the surfaces of Ti alloys**

Opis zadatka:

Elektrokemijska obrada je jedna od najkvalitetnijih, a ujedno i najskuplja obrada površine. Na površini metala postiže se visoki sjaj, te dolazi do smanjenja površinske hrapavosti. Jedan od glavnih zahtjeva kod postupaka prevlačenja jest dobra prionjivost prevlake na osnovni materijal, tj. adhezivnost prevlake. Uslijed slabe prionjivosti može doći do delaminacije prevlake te promjene svojstava proizvoda. Postupaci prevlačenja u parnoj fazi primjenjuju se na području izrade konstrukcijskih elemenata i alata u cilju povećanja njihove otpornosti i trajnosti. Prionjivost prevlake na podlogu ovisna je o nizu parametara od kojih je vrlo važna hrapavost podloge.

U ovom je radu potrebno:
1) dati pregled primjene Ti legura u industriji
2) opisati postupak elektronagrizanja kod pripreme površina
3) mijenjajući parametre elektrokemijskog nagrizanja izmjeriti hrapavost površine uzoraka
4) izmjeriti kut kvašenja površine
5) komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

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

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII

1. UVOD 1

2. PRIMJENA TITANIJEVIH LEGURA U INDUSTRIJI 2
   2.1. Titanij i njegove legure 2
   2.2. Primjene u arhitekturi 4
   2.3. Primjena u zrakoplovnoj industriji 5
      2.3.1. Vojna zrakoplovna industrija 7
   2.4. Primjena u automobilskoj industriji 8
   2.5. Primjena u brodogradnji 9
   2.6. Primjena u medicini 10
   2.7. Primjene u sportskoj industriji 11
   2.8. Primjene u kemijskoj industriji 12

3. ELEKTROPOLIRANJE 13
   3.1. Usporedba nemehaničkog i mehaničkog poliranja 13
   3.2. Mehanizam elektropoliranja 14
      3.2.1. Parametri obrade 16
      3.2.2. Elektroliti 16
      3.2.3. Posebni postupci 19
   3.3. Hrapavost površine 20

4. PREGLED LITERATURE 22
   4.1. Utjecaj elektropoliranja na mehanička svojstva i biokoroziju legure Ti-6Al-4V dobivene aditivnom proizvodnjom taljenja snopom elektrona 22
   4.2. Mehanizam elektropoliranja legure Ti-6Al-4V dobivene selektivnim laserskim srašćivanjem 22
   4.3. Utjecaj promjene parametara na elektropoliranje komercijalnog čistog titanija u elektrolitu baziranom na alkoholu 23
   4.4. Utjecaj elektropoliranja i magnetoelektropoliranja na koroziju i biokompatibilnost implantata od titanija 23

5. EKSPERIMENTALNI DIO 24
   5.2. Elektropoliranje 26
      5.2.1. Postupak elektropoliranja 26
      5.2.2. Mjerenje hrapavosti površine 27
      33
   5.3. Kut kvašenja 34
      5.3.1. Općenito o kutu kvašenja 34

5.3.2. Mjerenje kuta kvašenja 35
5.3.3. Rezultati mjerenja kuta kvašenja 36
6. ZAKLJUČAK 42
LITERATURA 43
PRILOZI 46

POPIS SLIKA

Slika 1. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama [1] ... 2
Slika 12. Guggenheim muzej u Bilbao-u [3] ... 4
Slika 13. Muzej znanosti i IMAX centar u Glasgow-u [3] ... 4
Slika 2. Primjeri primjene titanijevih legura [3] ... 5
Slika 3. Materijali korišteni u proizvodnji zrakoplova Boeing 777 [3] ... 6
Slika 4. Mlazni motor [4] ... 6
Slika 5. Blackbird SR-71 [4] ... 7
Slika 6. Usisni sustav (lijevo) i dijelovi od titanija (desno) [5] ... 8
Slika 7. Ispušni sustav [5] ... 8
Slika 8. Primjeri aplikacije titanija u plovilima [5] ... 9
Slika 9. Podmornica s trupom od titanija [5] ... 9
Slika 10. Zamjena kuka [8] ... 10
Slika 11. Zubni implantati (lijevo) i vijak od titanija (desno) [8] ... 10
Slika 14. Palice za golf i pribor za pecanje [9] ... 11
Slika 15. Izmjenjivač topline (lijevo) i rezervoar (desno) [10] ... 12
Slika 16. Mehanizam elektropoliranja [13] ... 16
Slika 17. Elektropoliranje tamponskim postupkom [16] ... 19
Slika 18. Parametar profila površine Ra [20] ... 21
Slika 19. Dimenzije ispitnih uzoraka ... 24
Slika 20. Ispitni uzorci nakon mehaničke predobrade ... 25
Slika 21. Ultrazvučni čistač ... 25
Slika 22. Postupak elektropoliranja ... 26
Slika 23. Mahr Perthen Perthometer S8P instrument s ticalom ... 27
Slika 24. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu I ... 29
Slika 25. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu II ... 31
Slika 26. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu III ... 33
Slika 27. Kut kvašenja [17] ... 34
Slika 28. Uređaj za mjerenje kuta kvašenja Dataphysics Contact Angle System OCA ... 36
Slika 29. Grafički prikaz kuta kvašenja po skupinama uzoraka ... 37
Slika 30. Profil hrapavosti i parametri početnog uzorka nakon predobrade brušenjem i poliranjem ... 46
Slika 31. Profil hrapavosti i parametri uzorka P1 nakon elektropoliranja ... 47
Slika 32. Profil hrapavosti i parametri uzorka P2 nakon elektropoliranja ... 48
Slika 33. Profil hrapavosti i parametri uzorka P3 nakon elektropoliranja ... 49
Slika 34. Profil hrapavosti i parametri uzorka P4 nakon elektropoliranja ... 50
Slika 35. Profil hrapavosti i parametri uzorka P5 nakon elektropoliranja ... 51
Slika 36. Profil hrapavosti i parametri uzorka P6 nakon elektropoliranja ... 52
Slika 37. Profil hrapavosti i parametri uzorka P7 nakon elektropoliranja ... 53
Slika 38. Profil hrapavosti i parametri uzorka P8 nakon elektropoliranja ... 54
Slika 39. Profil hrapavosti i parametri uzorka P9 nakon elektropoliranja ... 55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav titanijeve legure Ti6Al4V 24
Tablica 2. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja prve skupine uzoraka..... 28
Tablica 3. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja druge skupine uzoraka..... 30
Tablica 4. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja treće skupine uzoraka..... 32
Tablica 5. Rezultati mjerenja kuta kvašenja..... 36
Tablica 6. Usporedba kvašenja površina uzoraka 39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\boldsymbol{R_a}$	µm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
$\boldsymbol{R_{max}}$	µm	Najveća visina profila
$\boldsymbol{R_z}$	µm	Prosječna visina neravnina
$\boldsymbol{R_p}$	µm	Najveća visina vrha profila
$\boldsymbol{R_v}$	µm	Najveća dubina dola profila
$\boldsymbol{R_{pm}}$	µm	Prosječna visina vrhova
$\boldsymbol{m}$	mm	Srednja linija profila
$\boldsymbol{l_r}$	mm	Referentna duljina,
$\boldsymbol{l_n}$	mm	Ukupna duljina mjerene površine
$\boldsymbol{I}$	A	Jakost struje

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada prikazana su svojstva titanija i njegovih legura te primjena u industriji. Opisan je postupak elektropoliranja uključujući potrebne parametre za različite materijale, primjena navedenog postupka te prednosti nad konvencionalnim metodama poliranja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je elektropoliranje uzoraka titanijeve legure Ti-6Al-4V. Uzorci su prethodno mehanički polirani te je izmjerena hrapavost površine. Promjenom parametara struje i vremena tretiranja samog uzorka pokušao se utvrditi utjecaj navedenih parametara na promjenu hrapavosti površine. Nakon postupka elektropoliranja, na uzorcima je provedeno mjerenje hrapavosti površine te kut kvašenja površine.

Ključne riječi: Ti-6Al-4V, elektropoliranje, hrapavost, kut kvašenja

SUMMARY

First part of this paper gives a review of mechanical properties of titanium and titanium alloys and an insight of applications of titanium in industry. Furthermore, description of electropolishing is given with belonging parameters, application of the treatment and advantages over conventional methods of polishing.

In the experimental part, electropolishing of titanium alloy Ti-6Al-4V was carried out. Samples were previously mechanically polished and surface roughness was analyzed. Using different parameters od electric current and duration, we tried to establish the influence of different parameters on the change in surface roughness. After treatment, surface roughness and wetting angle were analyzed.

Key words: Ti-6Al-4V, electropolishing, surface roughness, wettability

1. UVOD

Titanij i njegove legure posljednjih desetljeća nalaze široku primjenu u različitim granama industrije zahvaljujući izvanrednim svojstvima kao što su visoka temperatura taljenja, mala gustoća, dobra otpornost na koroziju, stabilna mehanička svojstva u području temperatura od 200 do 600 °C. Čvrstoća i krutost titanija slična je čeliku s oko 40 % manjom gustoćom od čelika te većom čvrstoćom od aluminija. Negativna strana titanija je nizak modul elastičnosti, posljedično tome, ne može se dobiti veća krutost konstrukcije. Primjenu nalazi u više područja ljudskih djelatnosti kao što su svemirska industrija, zrakoplovstvo, medicina, kemijska industrija, automobilska industrija, arhitektura te u drugim područjima. Unatoč izvanrednim svojstvima, proizvodnja titanija i njegovih legura iziskuje značajna sredstva stoga se još uvijek smatra povlasticom. Upotrebom materijala od titanija, čovjek je unaprijedio kvalitetu svojih proizvoda te osigurao put modernom tehnološkom razvoju.

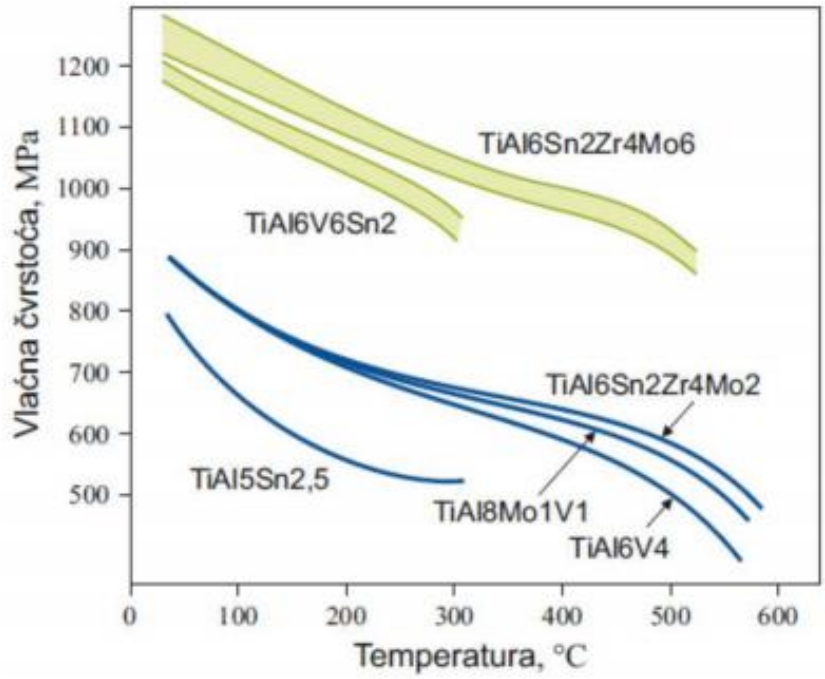
Elektropoliranje je postupak obrade površine metala kojim se može dobiti zahtijevana hrapavost površine. Površinska hrapavost je suma mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta, koje su značajno manje od površine samog predmeta, a prouzrokovane su različitim postupcima obrade ili nekim drugim utjecajima. Elektropoliranje se može koristiti kao priprema površine za npr. prevlačenje ili kao završna obrada. Za razliku od mehaničkih postupaka ne dolazi do strukturnih promjena jer nema unosa topline, mogu se otkriti nedostatci u materijalu te je moguće postići manju hrapavost nego konvencionalnim postupcima poliranja.

2. PRIMJENA TITANIJEVIH LEGURA U INDUSTRIJI

2.1. Titanij i njegove legure

Titanij je vrlo atraktivan konstrukcijski materijal zbog svoje visoke čvrstoće, niske gustoće i odlične korozijske postojanosti. Zahvaljujući ovim svojstvima, titanij predstavlja tehnički superiorniji konstrukcijski materijal od čelika i niklovih legura. Važno je napomenuti da svojstva titanijevih legura mogu značajno varirati, ovisno o vrsti legure i njenom mikrostrukturnom stanju određenom vrstom i udjelom legirnih elemenata. Nadalje, povećanjem temperature smanjuje mu se vlačna čvrstoća, slika 1. Titanij je polimorfan metal koji pokazuje alotropske transformacije kristalne rešetke te to bitno utječe na njegova svojstva. Osnovne prednosti primjene titanija i njegovih legura su [1]:

- Ušteda na težini - visoka čvrstoća u odnosu na masu omogućuje legurama titanija zamjenu čelika u mnogim primjenama gdje je odlučujuća čvrstoća i dobra lomna žilavost. Titanijeve legure su dvostruko lakše od čelika i niklovih superlegura.
- Visoka dinamička izdržljivost - imaju veću dinamičku izdržljivost od aluminija
- Toplinska stabilnost - ovisno o vrsti legure postojane su do 315 °C odnosno 600 °C



Slika 1. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama [1]

- Korozijska postojanost - znatno je bolja od čeličnih i aluminijevih legura. Titanijeve legure su postojane u raznovrsnim agresivnim medijima kao što su kiseline, lužine morska voda itd. [2].
- Odlična biokompatibilnost - titanij i njegove legure otporne su na djelovanje tjelesnih tekućina čime su vrlo zastupljene u medicini.
- Dobra otpornost na puzanje - određene titanijeve legure imaju znatnu otpornost na puzanje

Titanij i njegove legure su nemagnetične i vrlo dobro provode toplinu. Visoka dimenzijska stabilnost dijelova od titanija je posljedica niskog koeficijenta toplinske rastezljivosti (duplo manji od aluminija). Modul elastičnosti titanijevih materijala je 110 GPa ovisno o sastavu te procesu preradbe. Dijelovi od titanija su krući od aluminija, ali elastičniji od dijelova izrađenih od čelika. Hladno oblikovanje je ograničeno te se zahtjeva međužarenje u slučaju većeg stupnja deformacije. Kod viših temperatura je bolja oblikovljivost, ali se ne smije prijeći temperatura od 950 °C radi velikog afiniteta prema kisiku, vodiku, ugljiku i dušiku. Kod toplinske obrade ili deformiranja na zraku površina se prekriva oksidnom prevlakom koja se mora naknadno mehanički ukloniti. Nadalje, sitni dijelovi se toplinski obrađuju u vakuumu ili atmosferi inertnog plina. Teška je obrada odvajanjem čestica jer je titanij vrlo žilav pa se lijepi i može doći do zapaljenja strugotine. Visoku cijenu prati izrazita reaktivnost i visoka temperatura tališta koja iznosi 1670 °C. Primjena titanija je i danas ograničena radi velikih troškova prerade.

2.2. Primjene u arhitekturi

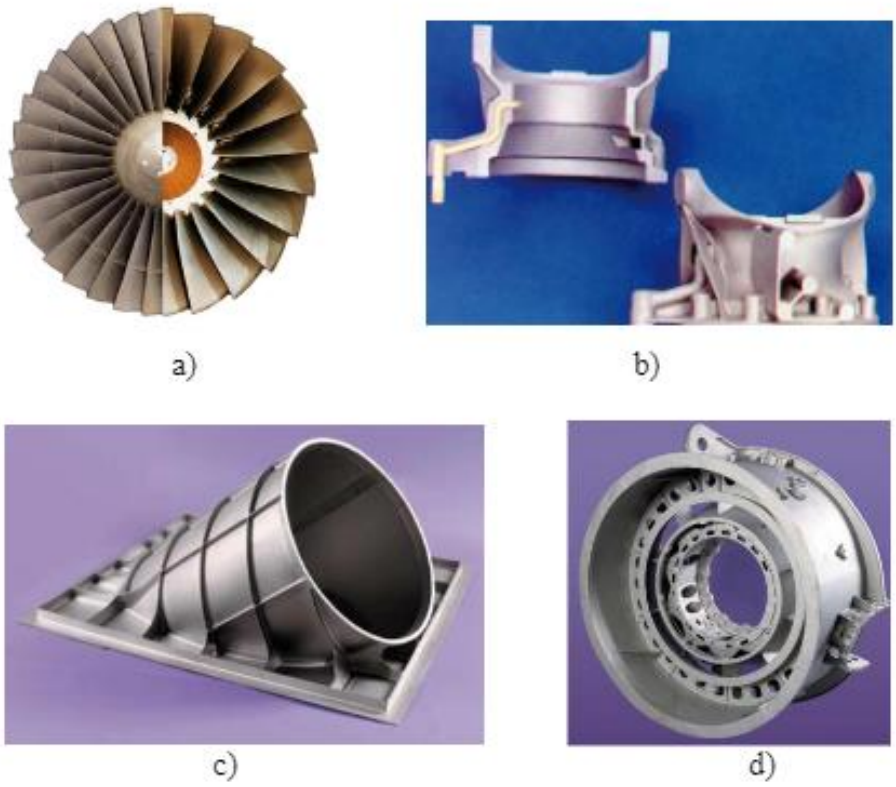
Visoka čvrstoća, mala masa i otpornost na koroziju čine titanij i njegove legure privlačnim materijalom u arhitekturi. Primjenjuje se za izradu vanjskih i unutarnjih obloga, krovova, zaštitnih obloga za stupove, spomenik i skulpture, krovove itd. Muzej Guggenheim u Bilbau (slika 12.) je obložen s 32000 m² ploča titanija. On je inspiracija europskim dizajnerima za inovativni pristup tako da su primjerice Muzej znanosti u Glasgow-u te obližnji IMAX centar (slika 13.) u potpunosti pokriveni oblogama od titanija. Titanij posjeduje nizak koeficijent toplinskog rastezanja koji je gotovo jednak koeficijentu stakla i granita te približan koeficijentu ekspanzije betona čime su dobivena minimalna toplinska naprezanja. Izrazito visoka otpornost koroziji rezultat je formiranja oksidnog sloja koji se obnavlja u slučaju oštećenja. Također je titanij otporan na točkastu koroziju te opću koroziju uzrokovanu kiselim kišama [3].

Slika 2. Guggenheim muzej u Bilbao-u [3]

Slika 3. Muzej znanosti i IMAX centar u Glasgow-u [3]

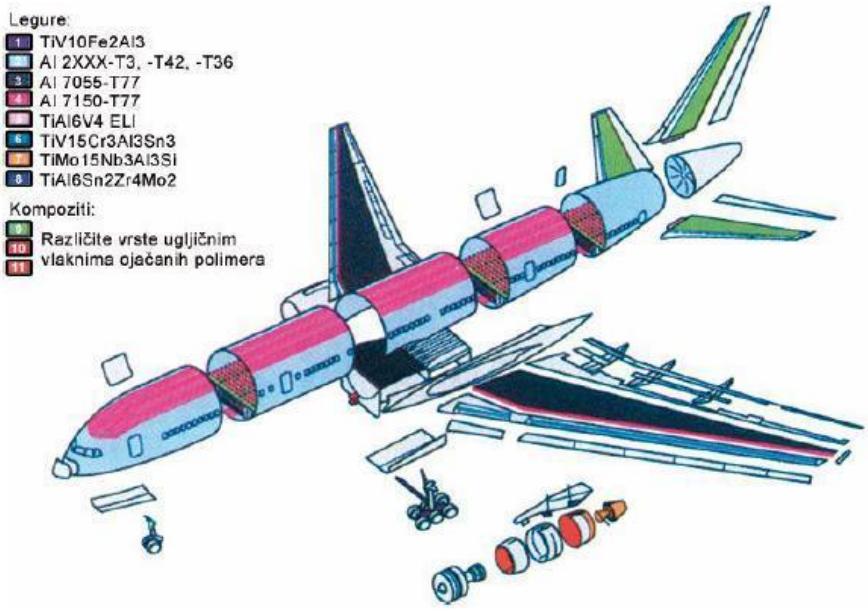
2.3. Primjena u zrakoplovnoj industriji

Primjena titanija u zrakoplovnoj industriji čini polovicu potražnje za titanijem u SAD-u, Europi i Rusiji. Titanijeve legure se u velikom obimu koriste za proizvodnju motora komercijalnih putničkih zrakoplova, čineći 20 do 30 % njegove mase. Tipični proizvodi od titanija su lopatice kompresora i ventilatora, mlaznice, glavine, kućišta te drugi dinamički visokooptereći elementi dobiveni preciznim lijevanjem tankostjenih, velikih i geometrijski složenih dijelova, slika 2., [3].



Slika 4. Primjeri primjene titanijevih legura [3]
a) lopatice ventilatora; b) precizno lijevani dijelovi helikoptera; c) precizno lijevana ispušna cijev pomoćnog sustava napajanja; d) precizno lijevano kućište ventilatora plinske turbine

Titanij ima istu toplinsku rastezljivost kao mnogi kompoziti pa je stoga vrlo privlačan materijal za primjenu u kompozitima kao ojačalo [3].



Slika 5. Materijali korišteni u proizvodnji zrakoplova Boeing 777 [3]

Na slici 3. je dan prikaz zastupljenosti različitih materijala u proizvodnji zrakoplova Boeing 777.

Titanijeve legure u zrakoplovstvu često zamjenjuju čelik i Ni legure čijom primjenom dolazi do smanjenja mase visoko opterećenih dijelova izloženih niskim i povišenim temperaturama. S rastućim cijenama goriva, stvara se potreba za zrakoplovima manje potrošnje. Budući da titanij ima dobar omjer mase prema čvrstoći, zrakoplovi s dijelovima od titanija su lakši i samim time troše manje goriva. Također, dolazi do zamjene dijelova od aluminija dijelovima od titanija zbog otpornosti na visoku temperaturu te otpornosti na koroziju u kontaktu s kompozitima. Otpornost na visoku temperaturu je vrlo bitna stavka u proizvodnji mlaznih motora (slika 4.) zbog zagrijavanja motora na temperaturu do 600 °C. [4]

Slika 6. Mlazni motor [4]

2.3.1. Vojna zrakoplovna industrija

U zrakoplovima se titanij koristi već 60 godina, pogotovo u vojnim zrakoplovima. Strukturnu masu vojnog zrakoplova F22 Raptor koji je ušao u uporabu krajem 2005. godine sačinjava 42 % titanija. Čak 60-ih godina otprilike 93 % strukturne mase Blackbirda (slika 5.) su činile titanijeve legure. Krila i trup ovog zrakoplova u potpunosti su prekriveni oplatom od lakih i čvrstih titanijevih legura [4].

Slika 7. Blackbird SR-71 [4]

Metalurgija praha je također jedna od vojnih aplikacija titanija i ograničena je na projektile i svemirska istraživanja. Mnoga vozila NASA-e namijenjena za put u svemir su izrađena upravo od titanija [4].

2.4. Primjena u automobilskoj industriji

U području automobilske industrije, titanij je prvi put upotrijebljen za izradu dijelova motora trkaćih automobila početkom 1980-ih. Napretkom tehnologije, područje primjene se proširilo na ispušne sustave trkaćih motocikala i automobile visokih performansi. Unatoč odličnim svojstvima kao što su velika čvrstoća, mala gustoća, u kombinaciji s praktičnom imunošću na koroziju, titanij nije zauzeo veliko mjesto u proizvodnji automobila zbog svoje visoke cijene [5].

Slika 8. Usisni sustav (lijevo) i dijelovi od titanija (desno) [5]

Na slici 6. prikazani su proizvodi od titanija koji se koriste u proizvodnji automobila.

Danas se titanijeve legure koriste za izradu dijelova kao što su ventili, opruge ventila, spojnice i okviri. Također se upotrebljavaju za izradu turbinskih dijelova motora kao što su lopatice kompresora, glavine, diskovi i nerotirajući dijelovi poput ispušnog sustava [5].

Slika 9. Ispušni sustav [5]

Na slici 7. prikazan je ispušni sustav motocikla koji sadrži dijelove od titanija.

2.5. Primjena u brodogradnji

Titanij je privlačan materijal u brodogradnji zbog svoje iznimne otpornosti na koroziju. Početkom 1960-ih, Kina je počela s istraživanjem primjene titanija u plovilima. Velikim naporima dobivena je legura titanija prikladna za plovila. Podmornice, ledolomci, hidrogliseri, hoverkrafti, propeleri (slika 8.) su neki od primjera aplikacije titanija [5].

Slika 10. Primjeri aplikacije titanija u plovilima [5]

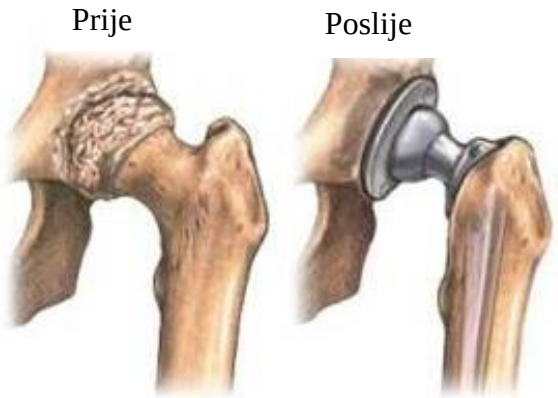
Također se titanij i njegove legure upotrebljavaju za izradu raznih metalnih komponenata na brodovima kao što su, spojnice, okviri, kuke, okovi itd. čime se sve više supstituira nehrđajući čelik. Ponajprije jer je titanij 40 % čvršći i lakši te najvažnije, nije sklon pucanju i korodiranju [5].

Slika 11. Podmornica s trupom od titanija [5]

Na slici 9. prikazana je podmornica s trupom od titanija.

2.6. Primjena u medicini

Lista prednosti primjene titanija u medicini je poduža. Neke od prednosti su: visoka čvrstoća, otpornost na koroziju, netoksičnost, biokompatibilnost, dugovječnost, nemagnetičnost, oseointegrabilnost, fleksibilnost i elastičnost slična ljudskoj kosti itd. Ti-6Al-4V je najčešća legura korištena u medicini. Kod stomatoloških implantata nudi odličnu otpornost na pucanje, a već spomenuta otpornost na koroziju te netoksičnost omogućuje joj da se nosi sa svim tekućinama u ljudskom tijelu. Također je iznimna dugovječnost koja kod primjerice dentalnih implantata iznosi do 20 godina. Nemagnetičnost omogućuje pacijentima s implantatima od titanija siguran pregled magnetskom rezonancom, a oseointegracija je jedinstveni fenomen gdje se kost sraste s implantatom tako tvoreći čvrstu vezu kosti i implantata. Titanij je jedan od nekolicine metala s ovim svojstvom. Neki od primjera upotrebe titanija su: vijci, pločice za povezivanje kostiju, umjetni kukovi, (slika 10.), šipke, žice, zubni implantati, vijci, (slika 11.), operacijski pribor itd. [8].



Slika 12. Zamjena kuka [8]

Slika 13. Zubni implantati (lijevo) i vijak od titanija (desno) [8]

2.7. Primjene u sportskoj industriji

Titanij je postao popularan u proizvodnji sportske opreme jer i najmanja redukcija u masi opreme može donijeti neku marginalnu prednost. Prva primjena je bila 1990-ih u palicama za golf iz razloga jer se mogla dobiti veća palica bez povećanja mase čime se poveća preciznost i veća udaljenost. Neke od karakteristika titanija važnih za aplikaciju u sportskoj opremi su: veliki omjer čvrstoće prema masi, otpornost na koroziju, otpornost na ogrebotine i oštećenja, niski modul elastičnosti. Najčešći proizvodi su: skije i skijaški štapovi, okviri bicikla, reketi za tenis, palice za golf, oprema za ribolov, (slika 14.), oprema za kampiranje, oprema za planinarenje, palice za bejzbol, oprema za ribolov, kacige za softball itd. Najčešća legura za izradu sportske opreme je TiAl3V2,5 [9].

Slika 14. Palice za golf i pribor za pecanje [9]

2.8. Primjene u kemijskoj industriji

Titanij je jako reaktivan metal, ali je izrazito otporan na koroziju zbog afiniteta prema kisiku i vlazi iz zraka. Na sobnoj temperaturi se stvara stabilan, čvrst i postojan oksidni sloj TiO_2 koji se regenerira u slučaju oštećenja. Ova karakteristika objašnjava veliku primjenu titanija u kemijskoj procesnoj industriji i energetici gdje je stalan utjecaj agresivne sredine. Titanij ne zahtijeva dodatnu zaštitu od korozije čime opravdava visoku cijenu s manjim troškovima održavanja. Prvi put se koristi 1960-ih godina za dijelove za kontrolu procesa u oksidirajuće kloridnom okruženju. Trenutno se koristi tamo gdje je aktivan utjecaj agresivnih medija kao što su kiseline, vlažni brom i aceton. Postojan je i na mravlju, limunsku, vinsku, stearinsku i taninsku kiselinu. Može se koristiti kao oprema za rukovanje s organskim kiselinama miješanim s neorganskim, solima i otopinama. Titanij se najčešće primjenjuje u slučajevima kada nehrđajući austenitni čelici ne osiguravaju zadovoljavajuću korozijsku postojanost. U kemijskoj industriji titanij se upotrebljava za posude, separatore, pumpe, izmjenjivače topline, rezervoare, (slika 15.), cijevi, hladnjake, tlačne reaktore, isparivače itd. Budući da je primarna otpornost na koroziju, a ne čvrstoća primjenjuje se nelegirani i niskolegirani titanij. Za povećanje otpornosti na koroziju preporučuje se upotreba titanija legiranog sa paladijom ili Ti0,3Mo0,8Ni [10].

Slika 15. Izmjenjivač topline (lijevo) i rezervoar (desno) [10]

3. ELEKTROPOLIRANJE

3.1. Usporedba nemehaničkog i mehaničkog poliranja

Poliranje je osnovna metoda završne obrade metalnih proizvoda radi dobivanja tražene hrapavosti i sjaja. U industriji, a također i u obrtima, troškovi mehaničkog poliranja predstavljaju više od 50 % troškova završne obrade komada. Mehaničkom obradom se najprije uklanjaju grube, a potom finije neravnine, dok je kod nemehaničkog poliranja obratno. Nadopunjavanjem mehaničkih postupaka nemehaničkim postupcima može se postići prosječno odstupanje profila R_a reda veličine 10 nm, pa čak i 1 nm ako su sitnozrnati materijali. Mehaničkim postupcima je gotovo nemoguće ostvariti takvu hrapavost.

Abrazivno poliranje korištenjem različitih vrsta diskova koji sadrže različite abrazivne smjese stvara gubitak materijala u iznosu od nekoliko % mase u slučaju malog objekata. Izdvajanje metala iz prašine nastale poliranjem je teško i skupo. U slučaju komada složene geometrije i malih dimenzija predlaže se metoda elektrokemijskog nagrizanja. Implementacijom ove metode dolazi do značajnih ušteda u troškovima te vremenu samog tretmana. Nadalje, moguće je izvući otopljene materijale iz elektrolita [11].

Mehaničkom predobradom vrlo mekih i vrlo tvrdih metala, tj. mehanički osjetljivijih predmeta, dolazi do pojave problema koji se ne javljaju kod nemehaničkog poliranja. Nadalje, mehaničkim poliranjem dolazi do nastajanja deformiranih površinskih slojeva sa smrvljenim kristalnim zrnima i tlačnim naprezanjima. U slučaju kombiniranog mehaničkog te potom nemehaničkog poliranja, ti slojevi se djelomično uklanjaju otapanjem čime se povećava udarna žilavost no smanjuje se površinska tvrdoća postignuta mehaničkim poliranjem. Isključivo kemijskom ili elektrolitičkom obradom ne dolazi do promjene udarne žilavosti i tvrdoće obrađivanih komada.

Pri mehaničkoj predobradi može doći i do strukturnih promjena u metalima zbog zagrijavanja te utiskivanja abraziva i strugotina u njihovu površinu, a predmeti se poliranjem pastama osim toga i zamašćuju. S druge strane, nemehaničko poliranje ne prate navedeni nedostaci ali takvu obradu puno više ometaju površinski slojevi produkata korozije i masnih tvari. Elektropoliranjem se mogu ukloniti tanji slojevi masnih tvari i produkata korozije, ali postiže se manja kvaliteta površine u slučaju obrade nečistih predmeta. U slučaju debljih slojeva onečišćenja, ovaj postupak nije primjenjiv.

Za razliku od mehaničkih postupaka, koji gnječenjem površinskih slojeva prikrivaju pogreške u materijalu, nemehaničkim poliranjem se one otkrivaju otapanjem. To je razlog podvrgavanja kemijskom i elektrokemijskom poliranju samo visokokvalitetnih metala bez pora, pukotina i uključaka, što isključuje odljevke. Iako je otkrivanje pogrešaka estetski nepovoljno, vrlo je korisno kod obrade dijelova izloženih velikim mehaničkim opterećenjima ili agresivnim sredinama, tj.kod dijelova koji iz funkcionalnih razloga ne smiju imati defekata (npr. elektronički elementi).

Procesi prevlačenja nakon obrade poliranjem su bolji u nekim slučajevima ukoliko se nemehanički polira. Kod anodizacije aluminija ili nanošenja galvanskih prevlaka, predmeti se mogu kemijski ili elektrolitički polirati obješeni na nosače koji služe za izvođenje ostalih tehnoloških operacija. Također, neke prevlake bolje prianjaju uz kemijski ili elektrolitički obrađene površine nego one obrađene mehaničkim poliranjem. Ukoliko nakon elektropoliranja ostanu površinski filmovi, može doći do problema pri nanošenju prevlaka pa se kao i kod kemijskog poliranja otapaju dekapiranjem, odnosno bistrenjem, aktivacijom ili depasivacijom. Elektropoliranjem se teško postiže jednoličan sjaj, tj. glatkoća višefaznih struktura, što je prirodni rezultat elektrokemijskog mehanizma procesa [11].

3.2. Mehanizam elektropoliranja

Tijekom elektropoliranja, anoda je predmet od metala koji je uronjen u kupku. Određenim parametrima struje i temperature, hrapavost površine se smanjuje. Opis elektrokemijskog poliranja je dao Jacquet 1935. godine koristeći bakar kao anodu i otopinu fosfatne kiseline kao elektrolit. Primijetio je ovisnost potencijala i struje na anodi. Mjereći hrapavost zaključio je da je visina vrha profila manja od dubine dna profila. Električna otpornost je tako manja na vrhovima profila nego u udubinama profila. Zbog toga je jakost struje veća na vrhovima pa dolazi do selektivnog otapanja metala i posljedično tome poliranju mikrohrapavosti površine [11].

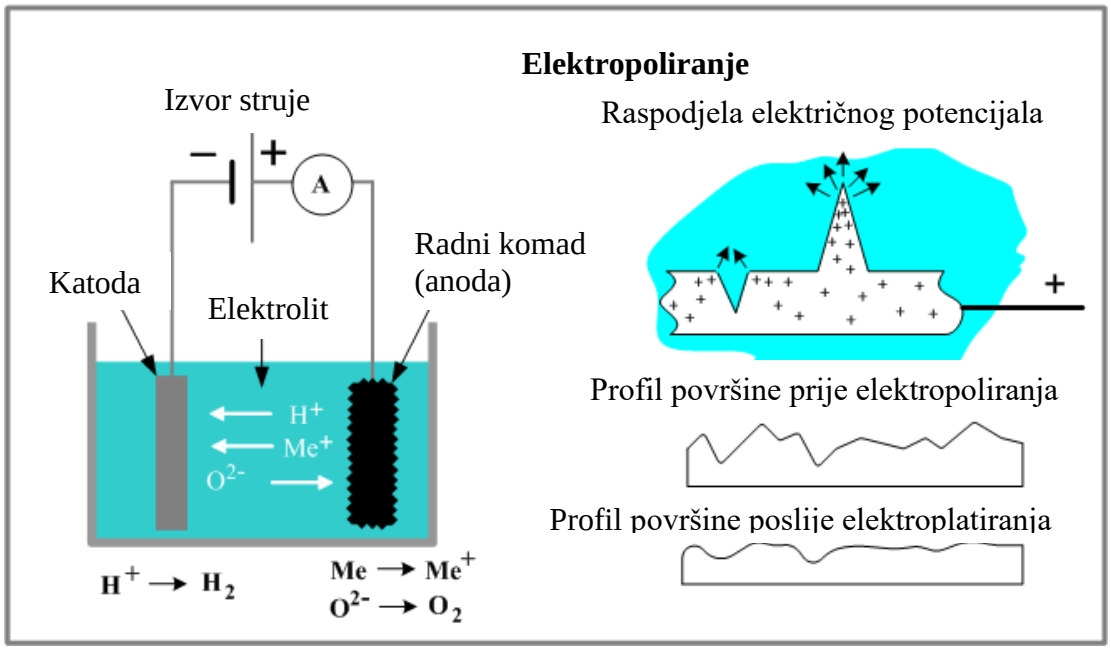
Elektropoliranje je elektrokemijski proces u kojem se nagriza anoda koja je uronjena u elektrolit potpomognuto dovodom struje u elektrolit. Kao katode se koriste nehrđajući čelici, olovo, grafit, bakar, nikal ili plemeniti metali s obzirom na vrstu kupelji. Katodni procesi su oslobađanje vodika i redukcija oksidansa. Mogu se reducirati i neki metalni ioni nastali otapanjem obratka, prvenstveno ioni bakra i plemenitih metala, čime se produžuje upotrebljivost i olakšava održavanje kupelji. Postoji veći broj primarnih komponenti

elektrolitske ćelije: anoda, katoda, izvor struje i elektrolit koji omogućuje reakciju. Unutar elektrolita istovremeno dolazi do elektrokemijskog nagrizanja anode te elektroplatiranja katode. Kako struja prolazi kroz uzorak, na izbočenim dijelovima će se koncentrirati električno polje i ubrzati nagrizanje, tako uzrokujući prvotno nagrizanje lokalno najizbočenijih dijelova. S druge strane, kada metalni ioni difundiraju u elektrolit i dođe do saturacije elektrolita, na površini anode će se formirati metastabilni film velikog otpora i viskoznosti. Ako film postane previše gust, spriječit će se difundiranje metala anode i samo poliranje [12].

Elektrokemijskim poliranjem se može smanjiti hrapavost površine te postići visok sjaj (elektroposjajivanje) odnosno poslusjaj (elektrosatiniranje). Dijelovi se spajaju kao anoda, tj. spajanjem na pozitivni pol izvora istosmjerne struje napona od 8 do 24 V u korozivnim vodenim otopinama. Anodni proces je ionizacija metala koja teče brže na mikroizbočinama nego na mikroudubinama, što znači da je postupak vrlo srodan kemijskom poliranju. Nadalje, elektropoliranjem se najprije gube fine, a nakon toga nešto grublje neravnine tako da na početku dolazi do posjajivanja te nakon toga i poravnanja neravnina. Stoga, ovaj postupak nije prikladan za obradu grubo hrapavih površina iako se katkad izvodi elektrosatiniranje, odnosno obrada predmeta jednolično ohrapavljenih ploha zbog postizanja polusjaja [13].

Postoji niz razlika između postupaka kemijskog poliranja i elektropoliranja. Elektropoliranjem je moguće dobiti još glađe ili sjajnije površine nego kemijskim poliranjem zbog odsutnosti katodnih reakcija. Nadalje, jednostavna je mogućnost regulacije brzine i kakvoće obrade promjenom anodne gustoće struje jer otapanje metala teče po Faradayevu zakonu. Upravo zbog toga, moguća je upotreba manje agresivnih sredina. Negativna strana elektrokemijskog poliranja je cijena koja je viša od cijene kemijskog poliranja jer je potreban izvor istosmjerne struje, električne armature i katode. Također, treba svaki obradak prije obrade spojiti na pozitivni izvod izvora struje montažom na vodljivi nosač odnosno žicu. Često se primjenjuje žica od istog ili srodnog metala od koje je i obradak, ali se ona redovito maskira plastičnim folijama ili premazima kako ne bi došlo do otapanja. Nadalje, elektropoliranje malih predmeta često je neekonomično ili čak neprovedivo zbog otežanog uspostavljanja kontakta sa pozitivnim polom izvora struje. Postupak elektropoliranja velikom gustoćom struje nije prikladan za veće predmete jer dolazi do pregrijavanja kupelji zbog Joulove topline. Također, na visokoprofiliranim komadima teško je postići uravnotežen sjaj zbog nejednolične razdiobe struje. Kod elektropoliranja na obracima teku i sporedni anodni procesi, oslobađanje kisika i/ili

nastajanje metalnog oksida. Ako se oksid zadrži na površini, nužno je kratkotrajno dekapiranje čime se obično povećava sjaj [13]. Na slici 16. dana je shema opreme za elektropoliranje.



Slika 16. Mehanizam elektropoliranja [13]

3.2.1. Parametri obrade

Gustoće struje se kreću između 1 i 60 A/dm², a temperatura od 20 do 80 °C. Učinak se uz velike gustoće struje brzo postiže, pa obrada obično traje od 1 do 10 min. Potrebno vrijeme obrade obrnuto je proporcionalno primijenjenoj gustoći struje, prema *Faradayevu* zakonu. Strujno opterećenje elektrolita je 1 A/dm³ bez hlađenja, a do 3 A/dm³ uz hlađenje. Temperiranje kupelji izvodi se hlađenjem ili grijanjem. Može se grijati *Jouleovom* toplinom, ali postoji opasnost od pregrijavanja, stoga treba ugraditi rashladnu spiralu u rashladnu posudu ili povećati volumen elektrolita [13].

3.2.2. Elektroliti

Kupelji za elektropoliranje slične su onima za kemijsko poliranje, ali budući da se metal ne otapa korozijom već anodnom strujom, mogu biti manje korozivne. Postoje univerzalni za poliranje mnogih i specifični elektroliti za poliranje samo pojedinih metala. Najuniverzalniji elektroliti su *Jacquetovi* (č. Žakeovi) na osnovi perklorne kiseline, $HClO_4$ i organskih tvari. Oni uz $HClO_4$ masenog udjela 5 do 65 % te vode udjela 5 do 40 % kao ostatak često sadrže octenu kiselinu, njezin anhidrid ili etanol. Optimalni rezultati se postižu u kupeljima srednjih i

velikih koncentracija perklorne kiseline u kojima ima malo vode. Postupak se provodi na temperaturi približnoj 35 °C uz 1 do 400 A/dm², za što je potreban napon izvora struje od 10 do 70 V. Odgovarajuća gustoća struje ovisi o metalu koji se obrađuje pa je recimo aluminij moguće polirati s približno 1 A/dm² , dok za obradu nikla treba više od 40 A/dm². U ovakvim kupeljima se obrađuju ugljični i nehrđajući čelici, lijevano željezo, aluminij, titanij, magnezij, nikl, krom, cirkonij, cink, kadmij, kositar, olovo te njihove legure najčešće primjenom katode od nehrđajućeg čelika. Zbog opasnosti od požara i eksplozija s kupeljima visoke koncentracije $HCLO_4$, kupelji se ne smiju grijati iznad 40 °C. Vrlo je bitno napomenuti da te kupelji ne smiju doći u dodir s piljevinom zbog mogućnosti eksplozije. Sastojci *Jacquetovih* elektrolita reagiraju s bakelitom i pleksistaklom, a inertni su na polietilen, polivinilklorid, polistiren i tvrdu gumu tako da se tim materijalima mogu obložiti radne kade [14].

Univerzalne kupelji se također mogu pripremiti na osnovi fosfatne kiseline i krom (VI) oksida , CrO_3. Takve kupelji s približno 330 g/dm³ H_3PO_4 i približno 370 g/dm³ CrO_3 redovito sadrže nešto fluoridne, sulfatne, limunske, ortoboratne kiseline i sl. Univerzalna kupelj je također i koncentrirana fosfatna kiselina uz dodatak CrO_3 približnog udjela od 150 g/dm³. S obzirom na to da je ta kupelj vrlo viskozna, treba ju za vrijeme rada snažno miješati. Fosfatno kromatne kupelji s katodama od bakra ili nehrđajućeg čelika koriste se za obradu ugljičnih i nehrđajućih čelika, aluminija i njegovih legura, bakra i njegovih legura, nikla, cinka, kositra i olova. Zadovoljavajući rezultati se postižu i elektropoliranjem različitih metala u otopinama koje se dobivaju miješanjem metanola s koncentriranom nitratnom kiselinom ili etanola s butanolom, eventualno uz dodatak $AlCl_3$ i $ZnCl_2$ [14].

U slučaju poliranja ugljičnih i nekih niskolegiranih čelika u obzir dolaze otopine sulfatne i fosfatne kiseline uz dodatak CrO_3, dekstrina i sl. Navedena smjesa služi i za obradu nehrđajućih čelika, a optimalni rezultati se postižu na austenitnim CrNi čelicima. Također se za te, a i donekle za druge nehrđajuće čelike, primjenjuju kupelji na osnovi fosfatne kiseline i glicerola, odnosno metanola te limunske i sulfatne kiseline [14].

Osim *Jacquetova* postupka za elektropoliranje aluminija koriste se još i Brytal, Alzac, Battelle te postupak s krom-sumpornom kiselinom.

Otopina za *Brytal postupak* sadrži približno 150 g/dm³ Na_2CO_3 te 50 g/dm³ Na_3PO_4. Obrada se izvodi na temperaturi približnoj 80 °C uz gustoću struje od 3 do 5 A/dm² primjenom čeličnih katoda. Optimalni rezultati se postižu na rafiniranom aluminiju (rafinal) i njegovoj leguri s 2 % magnezija (reflektal) [14].

Za *Alzac postupak* koristi se otopina tetrafluorboratne kiseline masenog udjela 2,5 %, koja se dobiva prilikom pripremanja kupelji reakcijom fluoridne i ortoboratne kiseline. Postupak se izvodi na temperaturi od 30 °C uz gustoću struje od 2 do 6 A/dm² primjenom aluminijskih ili bakrenih katoda. Ovaj postupak je osobito prikladan za poliranje rafinala i reflektala [14].

Battelle postupak provodi se razrijeđenim smjesama fosfatne i sulfatne kiseline uzčest dodatak male količine glicerola , CrO_3, HNO_3 ili soli aluminija. Postupak se vrši primjenom katoda od olova ili nehrđajućeg čelika pri temperaturi 60 do 90 °C uz gustoću struje od 10 do 30 A/dm². Ova metoda pogodna je za elektropoliranje nerafiniranog aluminija i njegovih legura s magnezijem. Nadalje, kupelj koja sadrži CrO_3 upotrebljiva je za obradu durala [14].

Krom-sumporna kiselina s masenim udjelom sumporne kiseline od 70 % te 20 g/dm³ CrO_3 primjenjuje se za poliranje nerafiniranog aluminija te aluminijskih legura s magnezijem. Za taj postupak koriste se katode od olova, gustoća struje iznosi 40 do 60 A/dm², a temperatura je između 70 i 80 °C [14].

Elektropolirani aluminij i njegove legure nakon ispiranja redovito treba bistriti na temperaturi između 95 i 100 °C uranjanjem 5 do 10 minuta u fosfatnu kiselinu masenog udjela 3 % uz 20 g/dm³ CrO_3. Bakar i bakrove legure se također elektropoliraju u smjesama sumporne i fosfatne kiseline koje se inače primjenjuju u *Battellovom* postupku za obradu aluminija. Praškasti bakar se izlučuje na katodama od bakra, olova ili nehrđajućeg čelika tako da se elektroliti bar djelomično regeneriraju. Posljedično tome, katode se s vremena na vrijeme moraju izvaditi i čistiti struganjem. Kod temperatura nižih of 38 °C bakar se može elektropolirati i u koncentriranoj fosfatnoj kiselini, posebno u prisutnosti soli aluminija ili trovalentnog kroma, a primjenjuju se i elektroliti na osnovi fosfatne kiseline s dodatkom CrO_3 i sl. Smjese sulfatne i fosfatne kiseline možemo koristiti i za elektropoliranje nikla na kojem se zadovoljavajući rezultati također postižu u sulfatnoj kiselini masenog udjela 70 %. Srebro i kadmij se obično elektropoliraju u cijanidno lužnatim elektrolitima [14].

Metali koji se najčešće elektropoliraju su austenitni nehrđajuči čelici, aluminij, bakar, i njihove legure. Uglavnom se elektropolira u kiselim kupeljima već spomenutih i drugih anorganskih kiselina kao što su fluoridne (HF), ortoboratne (H_3BO_3), alkohola (etanola i glicerola), organskih kiselina (npr. limunske), njihovih soli itd. Za elektroposjajivanje rafiniranog aluminija odlična je lužnata kupelj na osnovi natrijeva karbonata (Na_2CO_3) i

natrijeva fosfata (Na_3PO_4). Ako metalni ion s CN^- daje topljivi kompleks (npr. zlato, cink, kadmij i srebro) elektropolirati se može i u lužnatoj kupelji cijanida (NaCN ili KCN) [14].

3.2.3. Posebni postupci

Elektropoliranje se može osim uranjanjem, izvesti i *tamponskim* postupkom (slika 17.) gdje je katoda obložena spužvastim materijalom natopljenim s elektrolitom. Tampon se blagim pritiskom pomiče po komadu koji je spojen anodno. Tim načinom se izbjegavaju velike struje. Ovakav način obrade je prikladan za velike predmete i lokalnu obradu. Za ovaj način obrade koriste se *Jacquetovi* elektroliti i posebne kupelji na osnovi fosfatne ili nitratne kiseline. U novije vrijeme se koristi i metoda elektropoliranja lako taljivim talinama. Primjerice nikal se dobro polira talinom koja sadrži NH_4Cl u masenom udjelu od 10 do 20 % te $NiCl_2$ u masenom udjelu od 0,5 do 1 %, a ostatak je urea. Postupak traje od 4 do 8 min na temperaturi između 120 i 130 °C uz gustoću struje od 2 do 4 A/dm² i naponu od 2,5 do 3 V primjenom katoda od nikla [14].

Slika 17. Elektropoliranje tamponskim postupkom [16]

Posljednjih godina se u elektrolitima pokušava polirati izmjeničnom strujom, no takav postupak uspijeva samo na metalima sklonima pravoj pasivnosti kao što su nehrđajući čelici i aluminij. Postupak se odvija za vrijeme anodne periode, a katodna perioda sprječava pasiviranje. Predmeti se nakon elektropoliranja moraju isprati vodom, eventualno obraditi

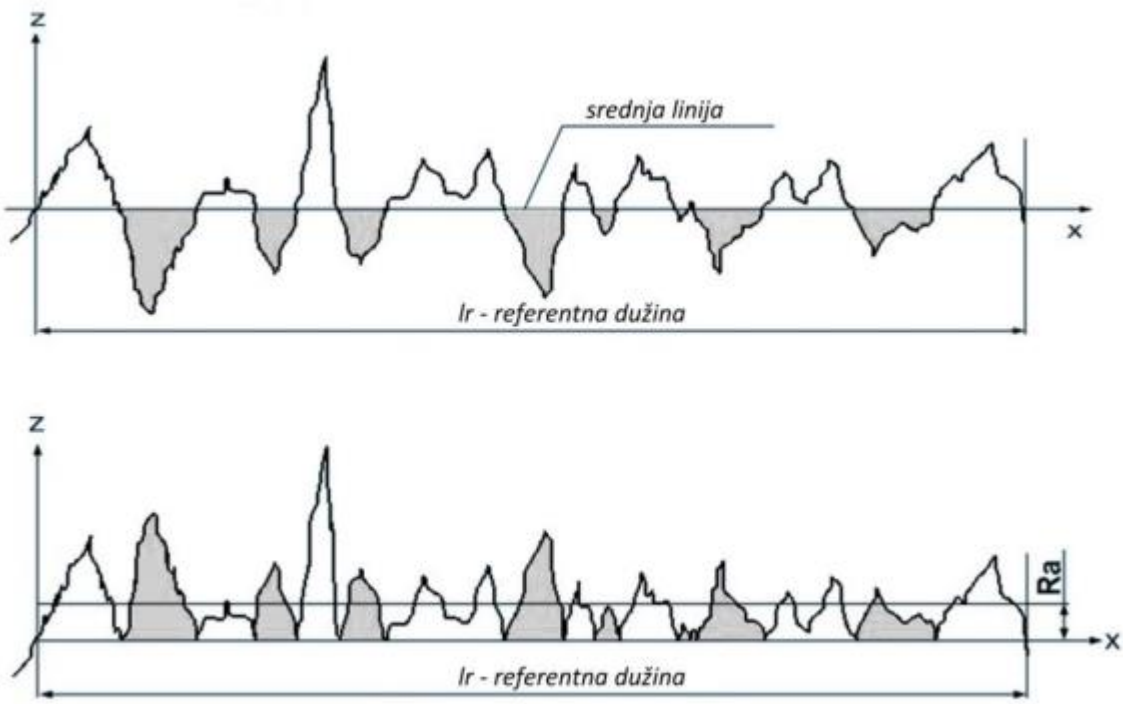
bistrenjem te ponovno isprati. Potrebno je osušiti samo ako se daljnja obrada ne izvodi u vodenim otopinama. Elektropoliranje ne služi samo za predobradu već i za završnu finu obradu prevlaka ili neprevučenih proizvoda, za završnu obradu zupčanika, mlaznica, rukavaca vratila, za oštrenje noževa, britvica, za skidanje srha, u metalografiji, u istraživačkom radu itd. U medicini, elektropoliranje se koristi za čišćenje medicinske opreme. Također se može koristiti kao priprema površine implantata kako bi se znatno povećala oseointegracija.

3.3. Hrapavost površine

Hrapavost površine je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su mnogo manje od površine samog predmeta, a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima [20].

Parametri profila površine dijele se na amplitudne, uzdužne, hibridne, krivuljne i srodne. Amplitudni parametri profila opisuju varijacije po visini profila i oni se najčešće koriste u industrijskoj praksi. Uzdužni parametri opisuju varijacije uzduž profila, hibridni opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika, a krivuljni i srodni opisuju varijacije na krivuljama dobivenih iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila. Glavni amplitudni parametri su:

- Srednje aritmetičko odstupanje profila, R_a, (slika 18.),
- Najveća visina profila, R_{max},
- Najveća visina vrha profila, R_p,
- Najveća dubina dola profila, R_v,
- Prosječna visina neravnina, R_z,
- Prosječna visina vrhova, R_{pm},
- Srednja linija profila, m,
- referentna duljina, l_r,
- ukupna duljina mjerene površine, l_n



Slika 18. Parametar profila površine R_a [20]

Srednje aritmetičko odstupanje profila (R_a) je univerzalan parametar hrapavosti za opću kontrolu kvalitete. Definira se kao apsolutna prosječna devijacija vrijednosti profila u granicama referentne duljine l_r. Najveća visina profila (R_{max}) je parametar vrlo osjetljiv na visoke vrhove i duboke ogrebotine. Definira se kao okomita udaljenost od najvećeg vrha i najdubljeg dola profila u kontrolnim granicama duljine l_n. Najveća visina vrha profila (R_p) je najveća visina profila iznad srednje linije profila u kontrolnim granicama duljine l_n. Najveća dubina dola profila (R_v) je najveća dubina profila ispod srednje linije profila u kontrolnim granicama duljine l_n. Prosječna visina neravnina (R_z) je prema ISO normi razlika između pet najviših vrhova i 5 najdubljih dolova u granicama referentne duljine l_r, a prema DIN-u definira se kao prosjek sume pet najviših vrhova i pet najdubljih dolova u kontrolnim granicama duljine l_n. Prosječna visina vrhova (R_{pm}) je srednja vrijednost sume najveće visine vrhova svih referentnih duljina l_r. Srednja linija profila (m) je linija koja sječe profil p tako da je u granicama referentne duljine l_r zbroj kvadrata udaljenosti y svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu [22].

4. PREGLED LITERATURE

4.1. Utjecaj elektropoliranja na mehanička svojstva i biokoroziju legure Ti-6Al-4V dobivene aditivnom proizvodnjom taljenja snopom elektrona

U radu se istražuje granica razvlačenja legure Ti6Al4V, dobivena aditivnom proizvodnjom taljenja pomoću snopa elektrona, nakon različitih tretmana elektropoliranjem. Ispravnim postupkom elektropoliranja parametar hrapavosti R_a se može poboljšati s vrijednosti od preko 24 μm na otprilike 4.5 μm, rezultirajući povišenjem granice razvlačenja od 7.6 % do 11.6 % te povišenjem vlačne čvrstoće u iznosu od 53 % bez ikakvih gubitaka modula elastičnosti. Nadalje, provedeno je *in vitro* testiranje na biokoroziju u simuliranoj ljudskoj tekućini. Potenciodinamičkom polarizacijom otkriveno je da se otpornost na biokoroziju povećava smanjivanjem hrapavosti površine ispravnim tretmanom elektropoliranja, no u slučaju predugog elektropoliranja može doći do *nanopittinga* čime bi se smanjila otpornost na biokoroziju [12].

4.2. Mehanizam elektropoliranja legure Ti-6Al-4V dobivene selektivnim laserskim srašćivanjem

U ovom radu analiziran je mehanizam elektropoliranja legure Ti6Al4V dobivene selektivnim laserskim srašćivanjem u elektrolitu od perklorne i octene kiseline. Istraživao se utjecaj promjene trajanja elektropoliranja s obzirom na morfologiju površine, kemijski sastav i otpornost na koroziju koristeći skenirajući elektronski mikroskop, mikroskop atomskih sila, rendgensku fotoelektronsku spektroskopiju, potenciodinamičku polarizaciju i spektroskopiju elektrokemijske impedancije. Rezultat je pokazao pojavu oksidnog filma, nakon obrade elektropoliranjem, sastavljenog od titanijevih, aluminijevih te vanadijevih oksida. Površinska hrapavost je bila najniža nakon 15 min obrade, tvoreći idealni efekt poliranja. Povećanjem vremena elektropoliranja, otpornost na koroziju u *Ringerovoj* otopini je prvotno porasla te potom pala. Povećanjem vanadijevih oksida povećavanjem vremena poliranja te pretvorbom iz nestabilnih TiO ili Ti_2O_3 u stabilan i kompaktan TiO_2 otkriven je pozitivan porast otpornosti na koroziju [24].

4.3. Utjecaj promjene parametara na elektropoliranje komercijalnog čistog titanija u elektrolitu baziranom na alkoholu

Elektropolirane su komercijalno čiste titanijeve folije korištenjem istosmjerne struje u elektrolitu baziranom na alkoholu. Istraživan je utjecaj promjene napona, vremena, temperature, miješanja na morfologiju površine te sadržaj oksida na površini. Rezultat istraživanja je pokazao optimalnu hrapavost površine korištenjem napona u rasponu od 35 do 75V s kraćim trajanjem obrade na višem naponu. Nadalje, povećanjem temperature elektrolita ubrzava se proces elektropoliranja te je dobivena manja hrapavost površine od obrade na nižoj temperaturi i kraćem vremenu obrade. Sastav oksida na površini ovisi o parametrima obrade i direktno utječe na morfologiju površine. Najmanju površinska hrapavost je uvijek pratila najmanja koncentracija oksida na površini [25].

4.4. Utjecaj elektropoliranja i magnetoelektropoliranja na koroziju i biokompatibilnost implantata od titanija

U ovom radu je provedeno elektropoliranje i magnetoelektropoliranje na komercijalno čistom titaniju, leguri Ti-6Al-4V te Ti-6Al-4V-ELI. Poznat je utjecaj ovih metoda na promjenu hrapavosti površine, kemijskog sastava, morfologije, kuta kvašenja, otpornosti na koroziju i biokompatibilnosti. Provedeni su in vitro ciklički potenciodinamički polarizacijski testovi u fiziološkoj otopini puferiranoj fosfatima u skladu sa standardom ASTM F-2129-12. Provedena su ispitivanja morfologije površine, hrapavosti i kuta kvašenja skenirajućim elektronskim mikroskopom, mikroskopom atomskih sila te goniometrom. Nadalje, ispitana je biokompatibilnost titanijevih legura uzgajanjem MC3T3 stanica preoblasta na njima. Istraživanje je pokazalo različit utjecaj dviju metoda na kemijski sastav površine. U oba slučaja je došlo do smanjenja oksida na površini legura. Nadalje, elektropoliranjem se promijenio kemijski sastav površine i morfologija stvaranjem porozne strukture, dok se kod magnetoelektropoliranja stvorila mikrogranularna struktura. Ispitivanje hrapavosti površine i kuta kvašenja je pokazalo manji utjecaj hrapavosti površine nego kemijskog sastava površine na kut kvašenja. Također, povećala se otpornost na pitting te koroziju u procjepu zbog stvaranja oksidnog filma. Nadalje, ostvareno je veće širenje stanica osteoblasta na obrađenoj površini za razliku od neobrađene površine [26].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom djelu rada provedeno je ispitivanje utjecaja parametara elektrokemijskog poliranja na promjenu hrapavosti površine legure Ti-6Al-4V. Uzorci navedene legure su mehanički polirani te potom elektropolirani različitim parametrima. Nakon obrade je na uzorcima izmjerena hrapavost površine te kut kvašenja.

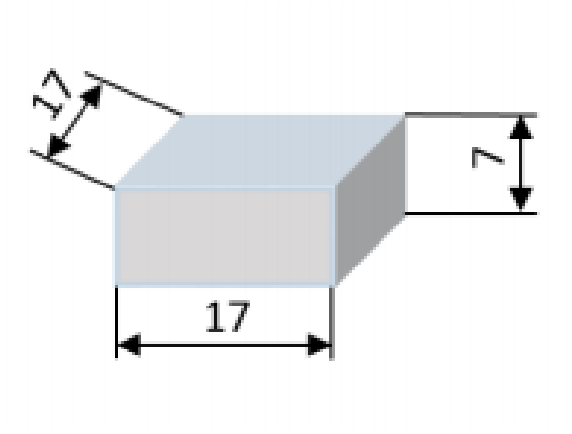
Kemijski sastav titanijeve legure Ti6Al4V prikazan je u tablici 1. pri čemu postotni udjeli elemenata predstavljaju maseni udio u leguri.

Tablica 1. Kemijski sastav titanijeve legure Ti6Al4V

Kemijski element	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
udio, [%]	6,5	4,5	0,25	0,13	0,08	0,05	0,0125	ostatak

5.1. Mehanička predobrada uzoraka

Predobrada uzoraka legure Ti-6Al-4V, dimenzija 17x17x7 mm (slika 19.), provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Provedeno je brušenje uzoraka na uređaju Buehler Phoenix Alpha. Korišten je papir za brušenje gradacije P320, brzina je bila 300 okr/min uz hlađenje vodom.



Slika 19. Dimenzije ispitnih uzoraka

Nakon brušenja provedeno je poliranje uzoraka u dvije faze na uređaju Struers DAP-V. U prvoj fazi poliranje je provedeno na ploči MD- Largo dijamantnom pastom granulacije 9 µm.

U sljedećoj fazi korište ja ploča MD-Chem i tekućina Silica granulacije čestica 0,03 µm. Brzina je u obje faze poliranja bila 150 okr/min, a sila pritiska 20 N uz korištenje lubrikanta. Na slici 20. prikazani su ispitni uzorci nakon mehaničke obrade poliranjem.

Slika 20. Ispitni uzorci nakon mehaničke predobrade

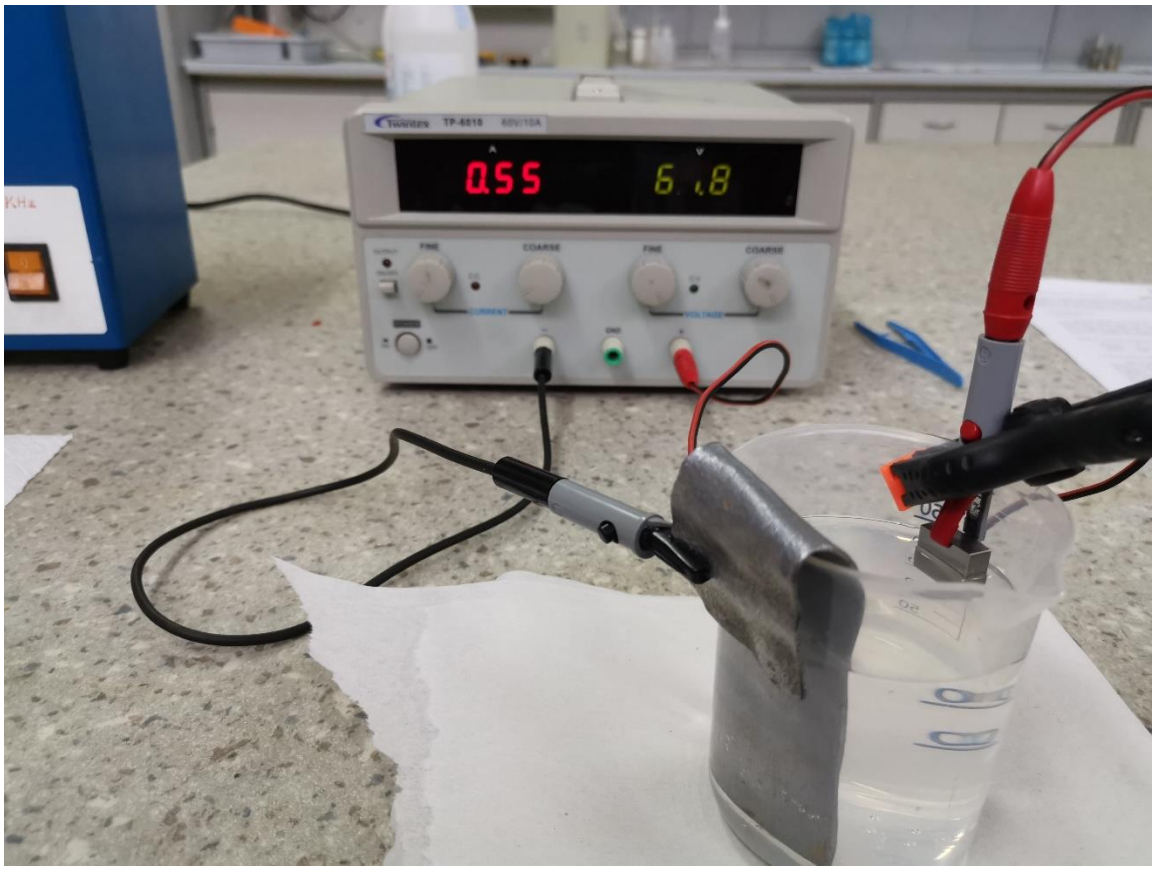
Uzorci su nakon mehaničke predobrade očišćeni etanolom u ultrazvučnom čistaču (slika 21.) te osušeni na zraku.

Slika 21. Ultrazvučni čistač

5.2. Elektropoliranje

5.2.1. Postupak elektropoliranja

Uzorci su podijeljeni u 3 skupine prema jakosti struje. U svakoj od skupina ispitana su 3 uzorka. Tako je za prvu skupinu struja iznosila 0,3 A, za drugu skupinu je struja bila 0,5 A, a za posljednju skupinu je struja iznosila 0,1 A. U svakoj od skupina uzorci su elektropolirani 5, 10 i 15 min. Uzorci su označeni slovom P ispred rednog broja uzorka. Katoda je bila od olova. Elektrolit je sadržavao perklornu kiselinu, octenu kiselinu i destiliranu vodu u volumnom omjeru 1:10:1.2. Istosmjerna struja je dovedene pomoću laboratorijskog napajača Twintex TP-6010 (slika 22). Temperatura elektrolita je bila 20 °C, a napon je bio stalnog iznosa od 60 V. Postupak elektropoliranja proveden je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 22. Postupak elektropoliranja

5.2.2. Mjerenje hrapavosti površine

Sva mjerenja hrapavosti provedena su u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (FSB) na elektroničko-mehaničkom uređaju s ticalom Mahr Perthen Perthometer S8P (slika 23). Mjerenja su provedena u skladu sa zahtjevima normi ISO 4287:1997, ISO 4288:1996 te ISO 3274:1996 [27, 28, 29]. Na svakom od uzoraka provedeno je jedno mjerenje hrapavosti.

Slika 23. Mahr Perthen Perthometer S8P instrument s ticalom

Podaci o hrapavosti dani su u tablicama 2. – 4., te grafički na slikama 24. – 26. Izmjerene hrapavosti uzoraka su u prilogu.

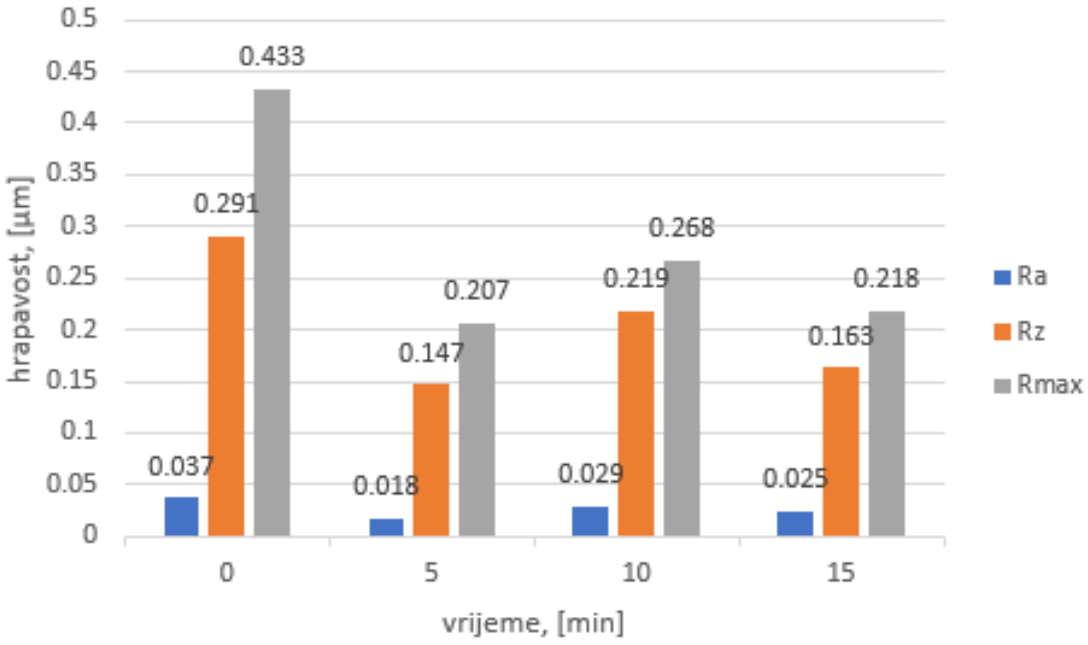
Tablica 2. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja prve skupine uzoraka

Uzorak		Početno	P1	P2	P3
Vrijeme, t [min]		0	5	10	15
Struja, I [A]		0	0,3	0,3	0,3
x	$\boldsymbol{R_a}$, [µm]	0,037	0,018	0,029	0,025
	$\boldsymbol{R_z}$, [µm]	0,291	0,147	0,219	0,163
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [µm]	0,433	0,207	0,268	0,218
s	$\boldsymbol{R_a}$, [µm]	0,007	0,004	0,005	0,003
	$\boldsymbol{R_z}$, [µm]	0,054	0,044	0,031	0,012
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [µm]	0,149	0,113	0,027	0,032
R	$\boldsymbol{R_a}$, [µm]	0,018	0,008	0,013	0,007
	$\boldsymbol{R_z}$, [µm]	0,135	0,114	0,089	0,028
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [µm]	0,339	0,298	0,080	0,072

U tablici 2. su prikazani rezultati mjerenja hrapavosti prve skupine uzoraka nakon elektropoliranja strujom od 0,3 A.

Gdje je:

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila;
- R_z – prosječna visina neravnina;
- R_{max} – najveća visina profila;
- R – raspon, razlika između najveće i najmanje izmjerene vrijednosti;
- s – procijenjeno standardno odstupanje;
- x – aritmetička sredina mjerenja.



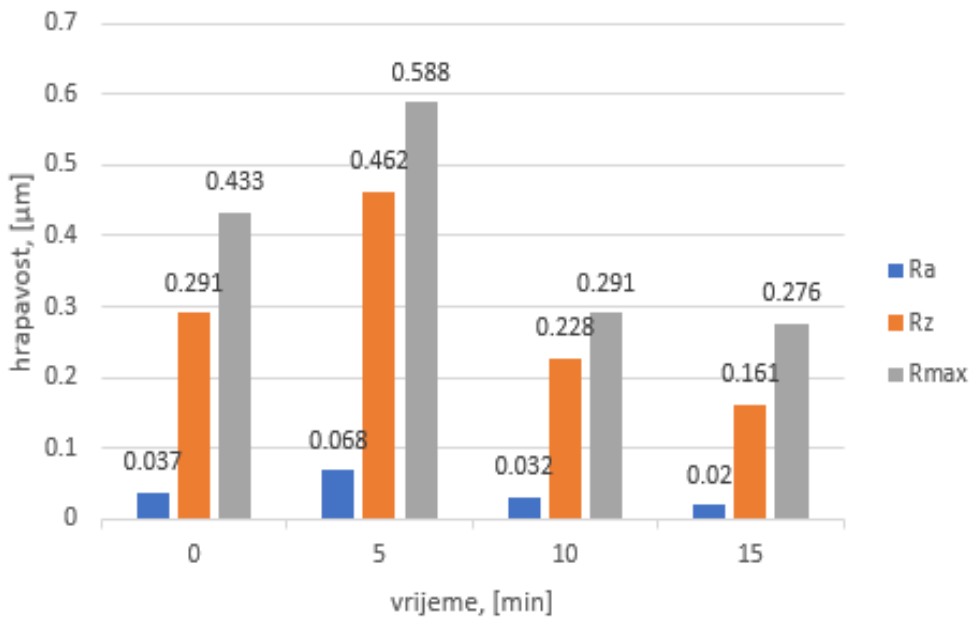
Slika 24. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu I

Na slici 24. je prikazan grafički prikaz parametara nakon elektropoliranja prve skupine uzoraka strujom od 0,3 A. Nakon obrade u trajanju od pet minuta došlo je do smanjenja hrapavosti u odnosu na početno stanje, daljnjom obradom u trajanju od deset minuta došlo je do povećanja hrapavosti, a obradom u trajanju od petnaest minuta došlo je do smanjenja hrapavosti u odnosu na obradu u trajanju od deset minuta. Najmanja vrijednost hrapavosti dobivena je obradom u trajanju od pet minuta te je dvostruko manja od početne vrijednosti.

Tablica 3. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja druge skupine uzoraka

Uzorak		Početno	P4	P5	P6
Vrijeme, t [min]		0	5	10	15
Struja, I [A]		0	0,5	0,5	0,5
x	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,037	0,068	0,032	0,020
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,291	0,462	0,228	0,161
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,433	0,588	0,291	0,276
S	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,007	0,006	0,003	0,003
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,054	0,045	0,016	0,047
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,149	0,123	0,038	0,187
R	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,018	0,018	0,007	0,008
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,135	0,121	0,043	0,124
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,339	0,329	0,109	0,488

U tablici 3. dani su rezultati amplitudnih parametara hrapavosti nakon elektropoliranja strujom jakosti 0,5 A.



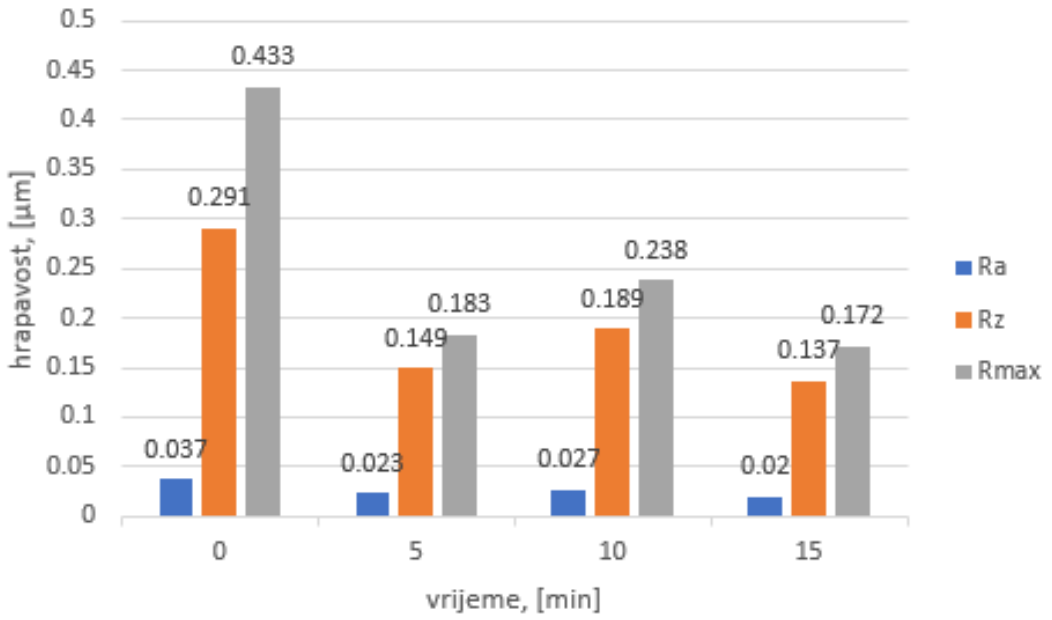
Slika 25. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu II

Na slici 25. prikazan je grafički prikaz parametara hrapavosti za drugu skupinu uzoraka elektropoliranu strujom od 0,5 A. Iz grafa je moguće vidjeti da je za razliku od obrade strujom od 0,3 A, nakon pet minuta došlo do prvotnog povećanja hrapavosti, potom drastičnog smanjenja elektropoliranjem u trajanju od deset minuta te konačnog smanjenja hrapavosti na najnižu vrijednost nakon petnaest minuta obrade. U slučaju obrade strujom od 0,5 A najbolji rezultati se postižu nakon petnaest minuta elektropoliranja.

Tablica 4. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon elektropoliranja treće skupine uzoraka

Uzorak		Početno	P7	P8	P9
Vrijeme, t [min]		0	5	10	15
Struja, I [A]		0	0,1	0,1	0,1
x	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,037	0,023	0,027	0,020
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,291	0,149	0,189	0,137
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,433	0,183	0,238	0,172
S	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,007	0,002	0,002	0,002
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,054	0,014	0,011	0,015
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,149	0,027	0,042	0,040
R	$\boldsymbol{R_a}$, [μm]	0,018	0,005	0,006	0,005
	$\boldsymbol{R_z}$, [μm]	0,135	0,038	0,034	0,037
	$\boldsymbol{R_{max}}$, [μm]	0,339	0,064	0,103	0,111

U tablici 4. dani su rezultati amplitudnih parametara hrapavosti nakon elektropoliranja strujom jakosti 0,1 A.



Slika 26. Grafički prikaz parametara hrapavosti za skupinu III

Na slici 26. prikazan je grafički prikaz parametara hrapavosti za treću skupinu uzoraka elektropoliranu strujom od 0,1 A. Nakon obrade u trajanju od pet minuta došlo je smanjenja hrapavosti. Obradom u trajanju od deset minuta povećala se hrapavost te konačno obradom od petnaest minuta smanjila se hrapavost na najnižu vrijednost. Možemo zaključiti da je u slučaju obrade strujom jakosti 0,1 A potrebno elektropolirati petnaest minuta.

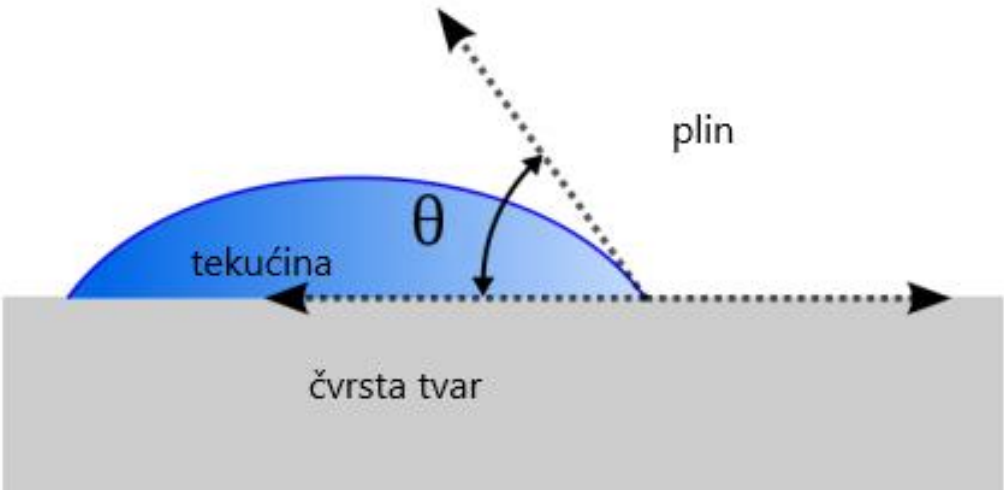
Mjerenjem površinske hrapavosti postupkom elektropoliranja dolazi do smanjenja hrapavosti površine te postizanja visokog sjaja što dokazuje pretpostavku iz literature [12]. Nadalje, elektrokemijska obrada je jedna od najkvalitetnijih, a ujedno i najskuplja obrada površine. Postupak elektropoliranja je primjenjiv kod pripreme površine za prevlačenje jer prionjivost podloge ovisi o nizu parametara od kojih je vrlo važna hrapavost podloge.

5.3. Kut kvašenja

5.3.1. Općenito o kutu kvašenja

Ako se u kontakt dovedu tekućina i čvrsta tvar dolazi do pojave kvašenja. U prirodi se odvijaju oni procesi pri kojima se smanjuje slobodna površinska energija sustava, stoga će tekućina močiti čvrsto tijelo samo ako mu se u tom slučaju smanjuje površinska napetost, tj. kada je površinska napetost tekućine manja od površinske napetosti površine čvrstog tijela s kojim je u kontaktu. Smanjenjem površinske napetosti povećava se kvašenje. Kada su u pitanju dvije tekućine različitih površinskih napetosti, čvrsta tvar će se bolje močiti tekućinom manje površinske napetosti. U većini slučajeva će tekućina močiti čvrsto tijelo zbog uglavnom manje površinske napetosti. Jedna od iznimki je živa koja ne moči gotovo nijednu čvrstu površinu već stvara na njoj kapljice u obliku kugle. Nadalje voda također ne moči sve površine. Budući da je voda vrlo polarna tekućina ona ne moči čvrste nepolarne tvari kao što su parafin, stearin i masti.

Kut kvašenja θ ili kontaktni kut (slika 21.) je kut koji zatvaraju tangenta povučena na površinu čvrste tvari i tangenta povučena na rub kapi tekućine u točci u kojoj se dodiruju čvrsta, tekuća i plinovita faza.



Slika 27. Kut kvašenja [17]

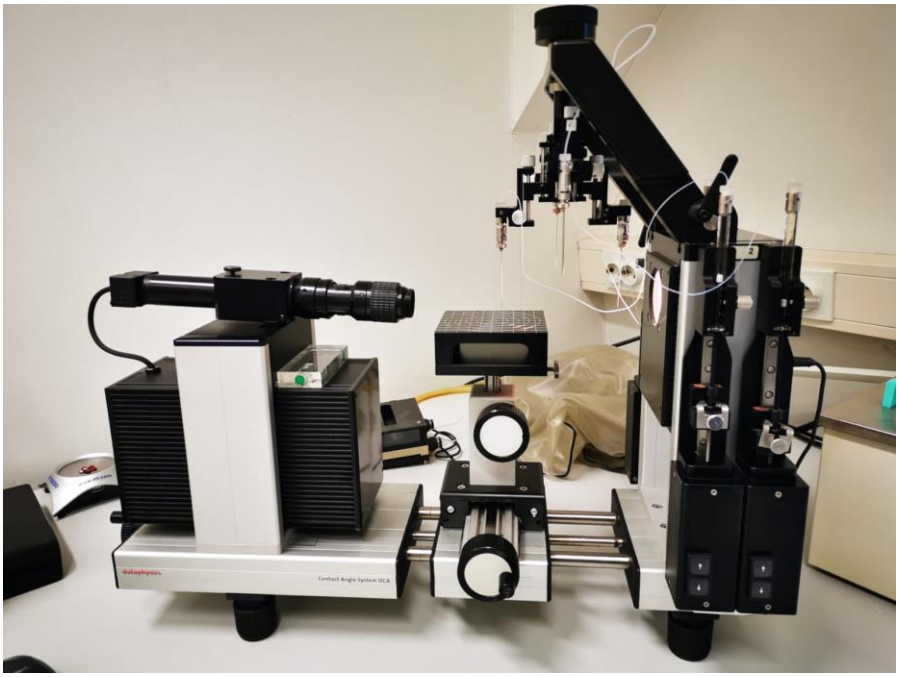
U slučaju kad je kut kvašenja jedna 0, tekućina će potpuno močiti površinu čvrste tvari i suprotno tome kad je kut kvašenja jednak 180°, tekućina neće močiti površinu čvrste tvari. Kada je kut kvašenja između 0 i 30°, smatra se da je ta površina visoko hidrofilna. Nadalje, u

svim slučajevima kada kut ne prelazi 90° smatra se da su čvrste površine hidrofilne te je dobro kvašenje. Vrijednosti kuta kvašenja većeg od 90° predstavljaju hidrofobnu površinu što rezultira nepotpunim kvašenjem [17].

Metoda viseće kapi (engl. S*essile drop test ili Sessile drop method*) je metoda utvrđivanja kuta kvašenja te slobodne površinske energije površina čvrstih tvari. Svojstva površine materijala povezana su s kemijskim vezama prisutnima na površini. Proces kvašenja možemo predočiti pomoću sila kohezije i adhezije. Za kapljicu visoke površinske napetosti koja se nalazi na čvrstoj površini niske površinske energije, sile privlačenja između molekula tekućine jače su od sila privlačenja između atoma krutine i molekula u tekućini.Stoga, tekućina tvori kap i veća je vrijednost kuta kvašenja. Ako se površinska napetost tekućine spusti, odnosno ako se poveća površinska slobodna energija čvrste tvari, sile privlačenja između atoma u krutini i molekula u tekućini postaju veće od sile privlačenja između tekućina pa se molekule tekućine šire po čvrstoj površini. Nadalje, što je niža površinska napetost tekućine veće, odnosno što je površinska energija čvrste tvari veća, proces kvašenja će biti bolji [18].

5.3.2. Mjerenje kuta kvašenja

Mjerenje kuta kvašenja provedeno je na Zavodu za inženjerstvo površina polimernih materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu. Za mjerenje je korišten goniometar Dataphysics Contact Angle System OCA (slika 28.). Goniometar je uređaj za mjerenje kontakntnog kuta s različitim testnim kapljevinama na različitim uzorcima (najčešće čvrstim). Mjerenja se provode na sljedeći način: kap testne kapljevine (volumena 1 – 10 µl) nanese se na uzorak pomoću sustava za injektiranje. Nakon uspostavljanja ravnoteže (10-30 sekundi) mjeri se vrijednost kontaktnog kuta koji kapljica zatvara s uzorkom. Tijekom mjerenja uzorak i kapljica vizualno se prate preko optičkog sustava (koji omogućava povećanje od 0,7 – 4,5x) spojenog na računalo. Rezultati se iskazuju kao prosječna vrijednost kontaktnog kuta dobivena s 5 – 10 mjerenja.



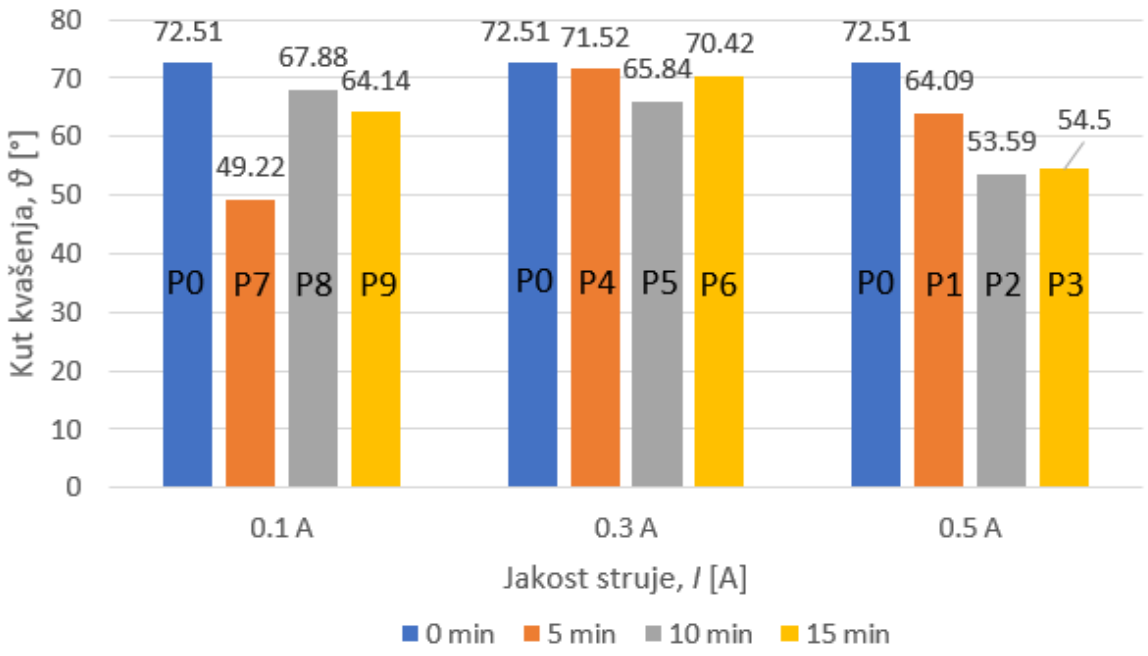
Slika 28. Uređaj za mjerenje kuta kvašenja Dataphysics Contact Angle System OCA

5.3.3. Rezultati mjerenja kuta kvašenja

Mjerenja su provedena na svakom od ukupno devet uzoraka. Na svakom uzorku je provedeno 10 ponavljanja. Izračunata je prosječna vrijednost te su rezultati u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja kuta kvašenja

Uzorak	Kut kvašenja, θ [°]
Početno (P0)	72,51
P1	71,52
P2	65,84
P3	70,42
P4	64,09
P5	53,59
P6	54,50
P7	49,22
P8	67,88
P9	64,14



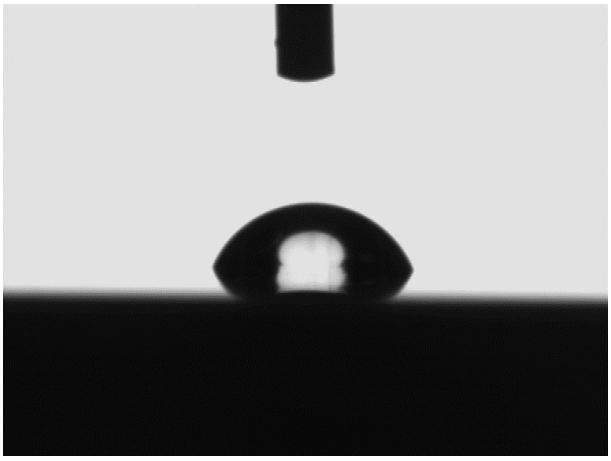
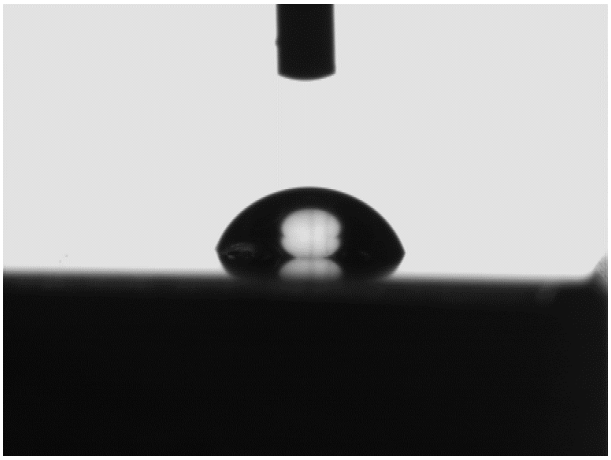
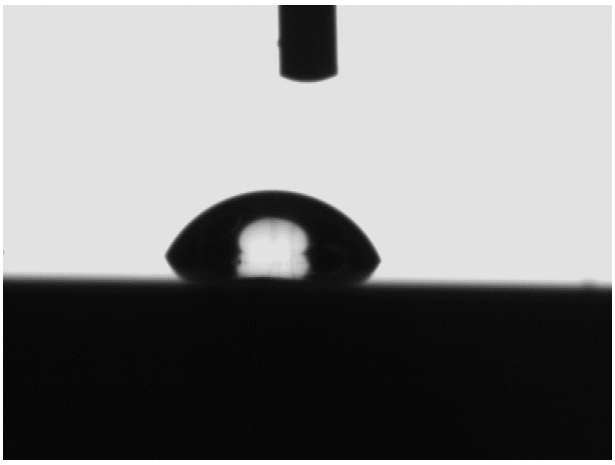
Slika 29. Grafički prikaz kuta kvašenja po skupinama uzoraka

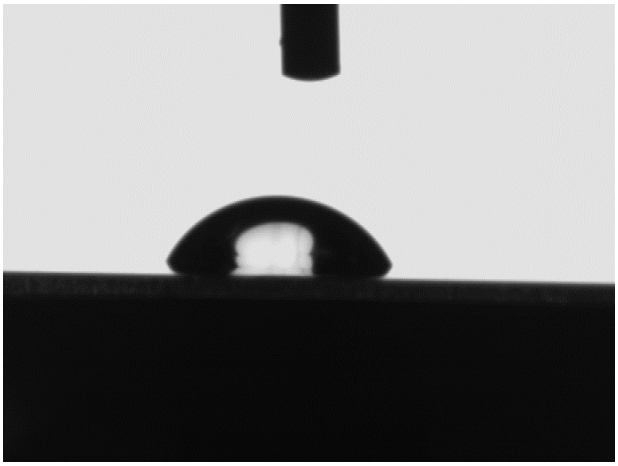
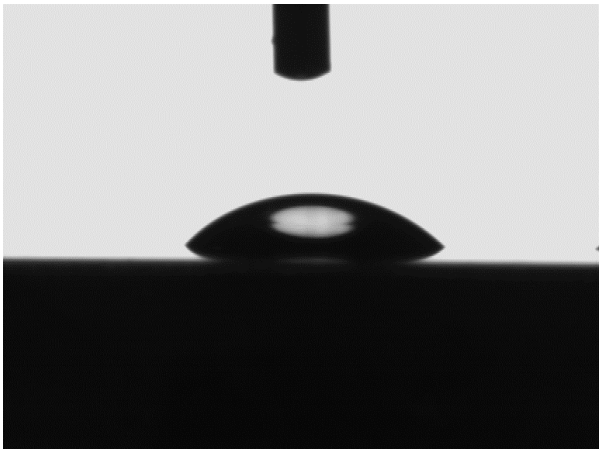
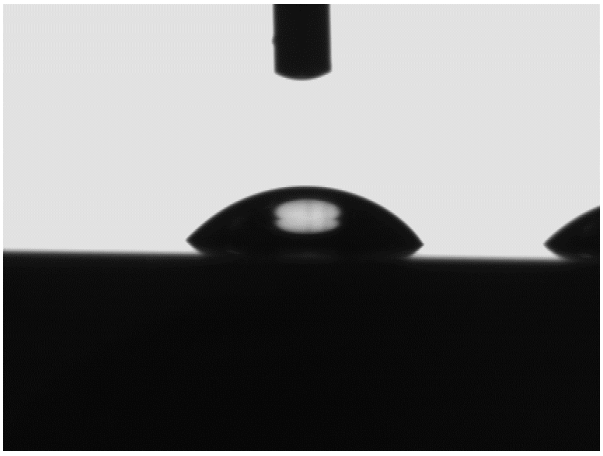
Na slici 29. prikazan je grafički prikaz kuta kvašenja s obzirom na vrijeme elektropoliranja i jakost struje. U skupini I i II gdje je jakost struje iznosila 0,3 te 0,5 A, kut kvašenja se smanjio nakon 10 minuta obrade u odnosu na obradu u trajanju od 5 minuta, no nakon 15 minuta obrade došlo je do povećanja kuta kvašenja. U skupini III gdje je jakost struje iznosila 0,1 A obradom u trajanju od 5 minuta ostvaren je najmanji kut kvašenja. Daljnjom obradom došlo je do prvotnog povećanja, a potom i smanjenja kuta kvašenja. Kako je granica za hidrofilnost površine manja od 90 °, sve površine pokazuju hidrofilnost. Analizom rezultata kuta kvašenja uočava se da se najmanji kut kvašenja dobije elektropoliranjem strujom od 0,1 A u trajanju od pet minuta.

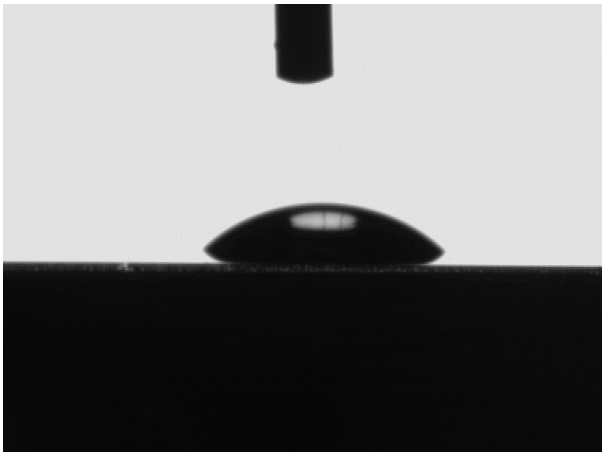
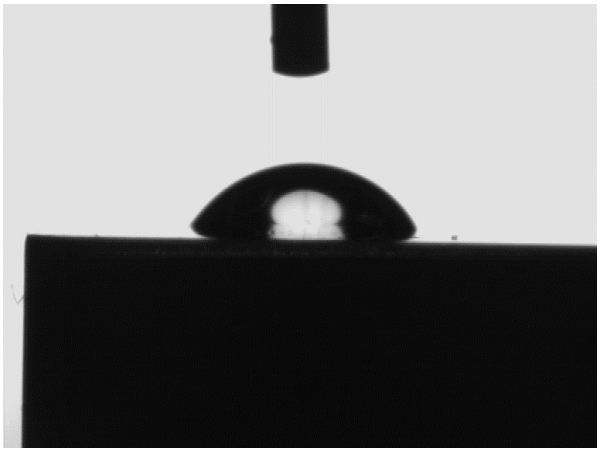
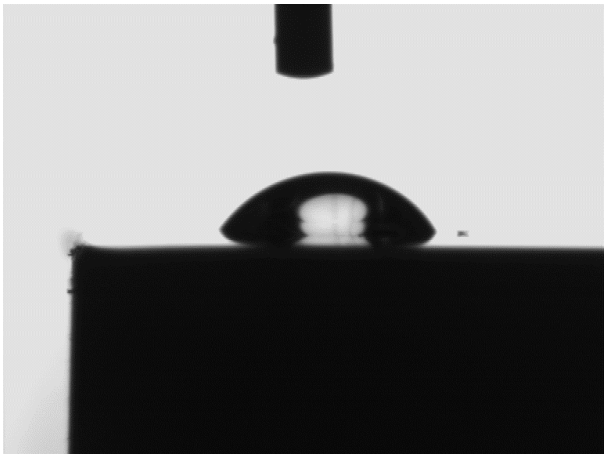
Usporedbom rezultata mjerenja hrapavosti površine i rezultata kuta kvašenja može se zaključiti da elektropoliranje strujom od 0,5 A dovodi do smanjenja parametara hrapavosti površine te ujedno i smanjenja kuta kvašenja nakon obrade u trajanju od 5 minuta. Daljnjom obradom u trajanju od 10 odnosno 15 minuta dolazi do manjeg smanjenja parametara hrapavosti te smanjenja i ujednačenja kuta kvašenja za navedena vremena obrade. Elektropoliranjem strujom od 0,1 i 0,3 A došlo je do smanjenja hrapavosti nakon obrade u trajanju od 5 minuta, potom povećanja parametara hrapavosti nakon obrade u trajanju od 10 minuta te konačno smanjenja parametara hrapavosti nakon 15 minuta obrade. Kut kvašenja se za navedene struje

kretao različito, odnosno u slučaju elektropoliranja strujom od 0,1 A došlo je do smanjenja, zatim povećanja te konačnog smanjenja kuta kvašenja nakon obrade u trajanju od 5, 10 i 15 minuta. Elektropoliranjem strujom od 0,3 A kut kvašenja se prvotno neznatno smanjio nakon 5 minuta obrade, potom je došlo do većeg smanjenja kuta kvašenja nakon obrade u trajanju od 10 minuta te konačno došlo je do povećanja kuta kvašenja nakon obrade u trajanju od 15 minuta. Možemo pretpostaviti da zbog nedostatka podataka o topografiji površine ispitanih uzoraka nije moguće povezati rezultate mjerenja hrapavosti i kuta kvašenja u slučaju elektropoliranja strujom od 0,1 odnosno 0,3 A.

Tablica 6. Usporedba kvašenja površina uzoraka

uzorak	slika kuta kvašenja
P1	
P2	
P3	

P4	
P5	
P6	

P7	
P8	
P9	

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja mjerenja hrapavosti površine te kuta kvašenja uzoraka nakon elektropoliranja različitim parametrima struje te trajanja može se zaključiti sljedeće:

- Optimalni parametri elektropoliranja su jakost struje u iznosu od 0,3 A te trajanje obrade u iznosu od pet minuta.
- Elektropoliranje strujom jakosti 0,1 te 0,5A dovesti će do najvećeg smanjenja parametra hrapavosti R_a nakon obrade u trajanju od petnaest minuta.
- Mjerenjem kuta kvašenja uzoraka sve površine pokazuju hidrofilnost. Najmanji kut kvašenja je moguće postići elektropoliranjem upotrebom struje u iznosu od 0,1 A u trajanju od pet minuta.

LITERATURA

[1] Ćorić Danko. Svojstva i primjena titana i njegovih legura (Prvi dio). Zavarivanje 59 5/6. 125-131; 2016. (16.1.2020.)

[2] Rede Vera. Posebni metalni materijali I. dio, Nastavna literatura FSB, Zagreb; 2019. (16.1.2020.)

[3] Ćorić Danko. Posebni metalni materijali III. dio, Nastavna literatura FSB, Zagreb; 2017. (19.1.2020.)

[4] https://tmstitanium.com/titanium-and-the-aerospace-industry/ (19.1.2020.)

[5] http://metalpedia.asianmetal.com/metal/titanium/application.shtml (19.1.2020.)

[6] Bišćan V, Leutić V. Svojstva titana i njegovih legura. Zbornik Veleučilišta u Karlovcu. UDK/UDC 546.821 : 669.018 (19.1.2020.)

[7] Šnajdar Musa Mateja. Razvoj titan-magnezij kompozita za biomedicinsku primjenu [doktorski rad]. Zagreb; 2015 (19.1.2020.)

[8] Schank Craig. Titanium: The Medical Metal of Choice. Supra Alloys. Dostupno na: http://www.supraalloys.com/medical-titanium.php (19.1.2020.)

[9] https://titaniumprocessingcenter.com/titanium-the-metal-of-choice-in-sporting-goods/ (19.1.2020.)

[10] Dedić Saudin. Primjena titana [seminarski rad].2015. Dostupno na: https://www.scribd.com/doc/253065979/Seminarski-Primjena-Titana-Final (19.1.2020.)

[11] Maciag T, Wieczorek J, Wecki B. Parameters selection for electropolishing process of products made of copper and its alloys. Arch. Metall. Mater. 62 (2017), 3, 1443-1447. DOI: 10.1515/amm-2017-0223 (22.1.2020.)

[12] Yao-Cheng Wu, Che-Nan Kuo, Yueh-Chun Chung, Chee-How Ng, Jacob C. Huang. Effects of Electropolishing on Mechanical Properties and Bio-Corrosion of Ti6Al4V Fabricated by Electron Beam Melting Additive Manufacturing. Materials 2019, 12, 1466; doi:10.3390/ma12091466 (22.1.2020.)

[13] Esih Ivan. Osnove površinske zaštite. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb; 2003. str. 66-68

[14] Esih Ivan, Dugi Zvonimir. Tehnologija zaštite od korozije II . Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb;1992. str.63-66

[15] Kopeliovich Dmitri. Electropolishing. SubsTech-Substances and Technologies, 2014. (2.1.2020.)

[16] https://en.edelstahl-maurer.ch/services/local-electropolishing.html (2.1.2020.)

[17] Cigula Tomislav. Kvalitativna analiza slobodnih površina tiskovnih formi [doktorski rad]. Grafički Fakultet Zagreb;2011. (2.2.2020.)

[18] Kumić Ivan. Novi postupak difuzijskoga modificiranja površina titanove legure za endoprotetske implantate [doktorski rad]. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb;2016. (2.2.2020.)

[19] MATRIB 2001. Površine i njihov dodir. Vela Luka;2001. (4.2.2020.)

[20] Baršić Gorana. Ispitivanje hrapavosti tehničkih površina. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb. (4.4.2020.)

[21] Researchgate. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-surface-roughness-parameters_fig1_323340273 (4.2.2020.)

[22] Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman H.H. Roughness parameters. Journal of Materials Processing Technology 2002, DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2 (4.2.2020.)

[23] Hrapavost tehničkih površina, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb;2007. Dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf (4.2.2020.)

[24] Zhang Yifei, Li Jianzhong, Che Shuanghang. Electropolishing Mechanism of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. International journal of Electrochemical Science 2018. doi; 10.20964/2018.05.79 (4.2.2020.)

[25] Altay M, Baydogan M. Effect of processing parameters on electropolishing of commercially pure Ti in an alcohol-based electrolyte. DOI: 10.1080/00202967.2018.1455379

[26] Rahman ur Zia, Pompa Luis, Haider Waseem. Influence of Electropolishing and Magnetoelectropolishing on Corrosion and Biocompatibility of Titanium Implants. Journal of Materials Engineering and Performance 2014. 23/11 str. 3907/3915.

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

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

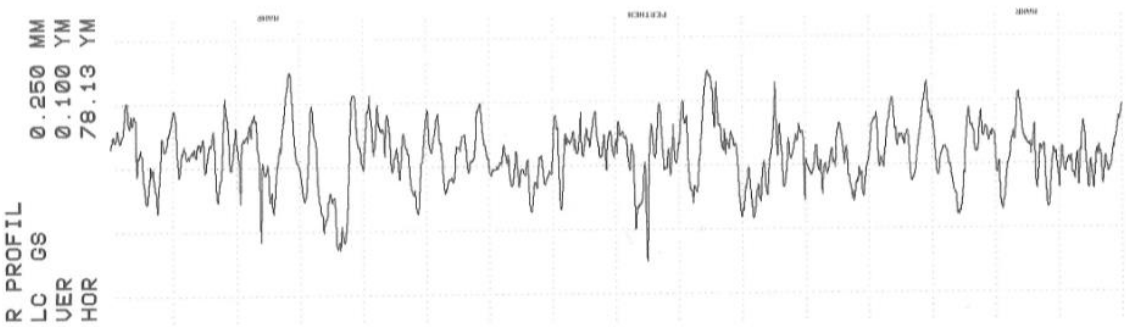
[29] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surfacetexture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instrument

PRILOZI

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:POCETNO STANJE NR.:12.12.2019. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.433	0.149	0.339	0.636	0.298		
2	RZ	YM	0.291	0.054	0.135	0.353	0.218		
3	RA	YM	0.037	0.007	0.018	0.041	0.024		
4	RP	YM	0.307	0.138	0.322	0.489	0.167		
5	RPM	YM	0.175	0.043	0.103	0.232	0.129		
6	WT	YM	0.208	0.136	0.375	0.421	0.046		
7	RT	YM	0.454	0.163	0.378	0.676	0.298		
8	PT	YM	0.560	0.142	0.393	0.711	0.318		

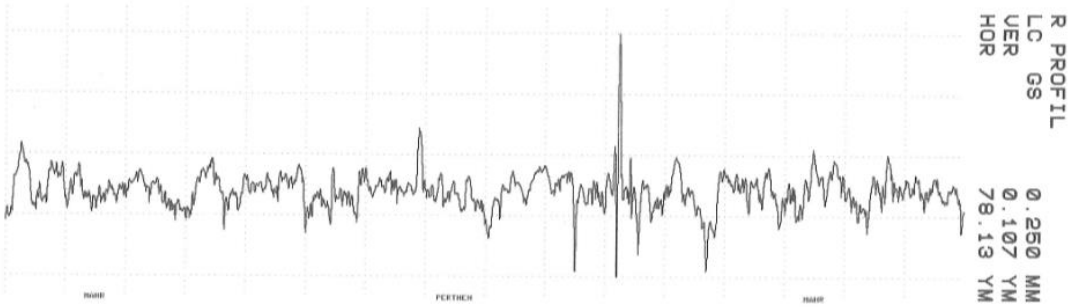


Slika 30. Profil hrapavosti i parametri početnog uzorka nakon predobrade brušenjem i poliranjem

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P1 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.207	0.113	0.298	0.427	0.129		
2	RZ	YM	0.147	0.044	0.114	0.218	0.104		
3	RA	YM	0.018	0.004	0.008	0.022	0.014		
4	RP	YM	0.112	0.088	0.237	0.278	0.041		
5	RPM	YM	0.066	0.030	0.085	0.121	0.036		
6	WT	YM	0.116	0.096	0.251	0.302	0.051		
7	RT	YM	0.220	0.115	0.297	0.427	0.130		
8	PT	YM	0.283	0.119	0.294	0.470	0.175		

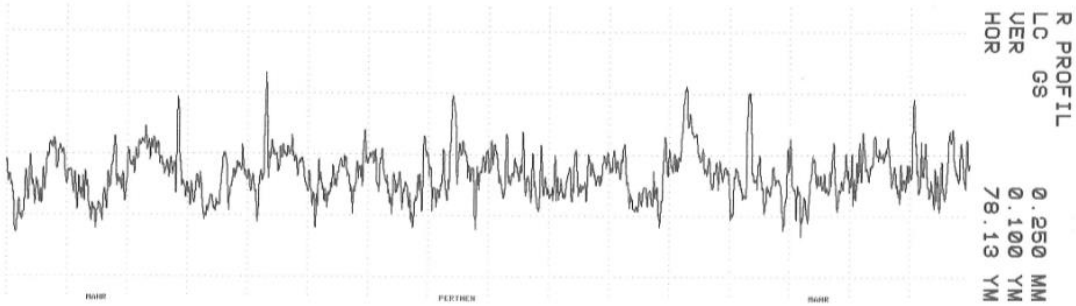


Slika 31. Profil hrapavosti i parametri uzorka P1 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P2 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.268	0.027	0.080	0.310	0.230		
2	RZ	YM	0.219	0.031	0.089	0.256	0.167		
3	RA	YM	0.029	0.005	0.013	0.037	0.024		
4	RP	YM	0.158	0.037	0.116	0.218	0.102		
5	RPM	YM	0.120	0.023	0.059	0.138	0.079		
6	WT	YM	0.146	0.049	0.137	0.217	0.080		
7	RT	YM	0.287	0.054	0.159	0.388	0.230		
8	PT	YM	0.364	0.063	0.173	0.484	0.311		

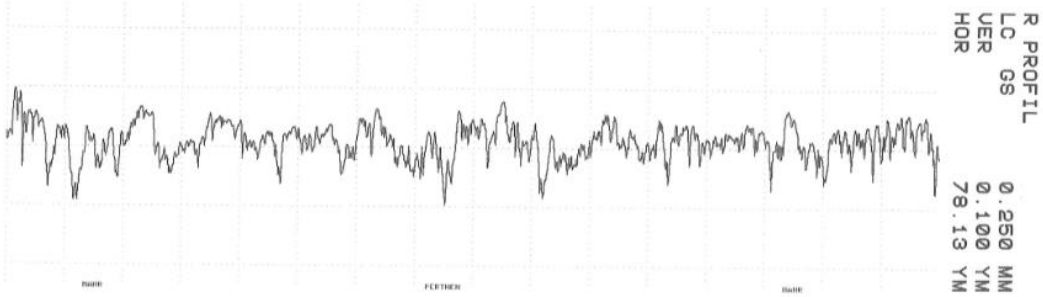


Slika 32. Profil hrapavosti i parametri uzorka P2 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P3 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.218	0.032	0.072	0.260	0.188		
2	RZ	YM	0.163	0.012	0.028	0.178	0.150		
3	RA	YM	0.025	0.003	0.007	0.028	0.021		
4	RP	YM	0.093	0.034	0.095	0.151	0.056		
5	RPM	YM	0.066	0.011	0.030	0.083	0.053		
6	WT	YM	0.099	0.043	0.117	0.169	0.052		
7	RT	YM	0.224	0.032	0.079	0.270	0.191		
8	PT	YM	0.271	0.027	0.075	0.309	0.234		

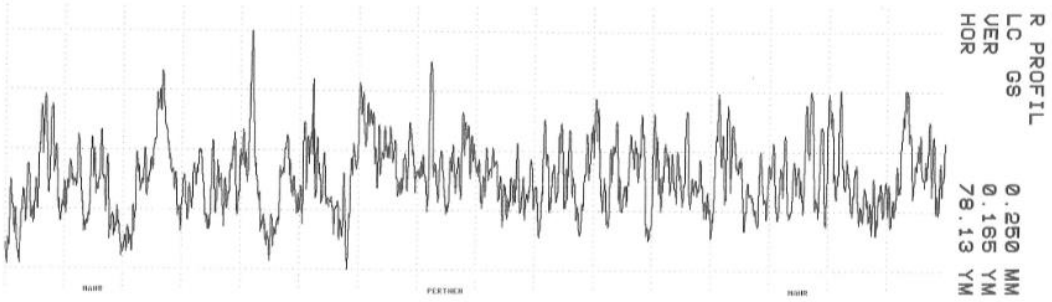


Slika 33. Profil hrapavosti i parametri uzorka P3 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK 4 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.588	0.123	0.329	0.804	0.475		
2	RZ	YM	0.462	0.045	0.121	0.526	0.404		
3	RA	YM	0.068	0.006	0.018	0.078	0.060		
4	RP	YM	0.317	0.046	0.137	0.401	0.264		
5	RPM	YM	0.251	0.033	0.093	0.295	0.202		
6	WT	YM	0.408	0.418	0.901	1.009	0.108		
7	RT	YM	0.602	0.113	0.306	0.804	0.498		
8	PT	YM	0.870	0.411	0.915	1.466	0.552		

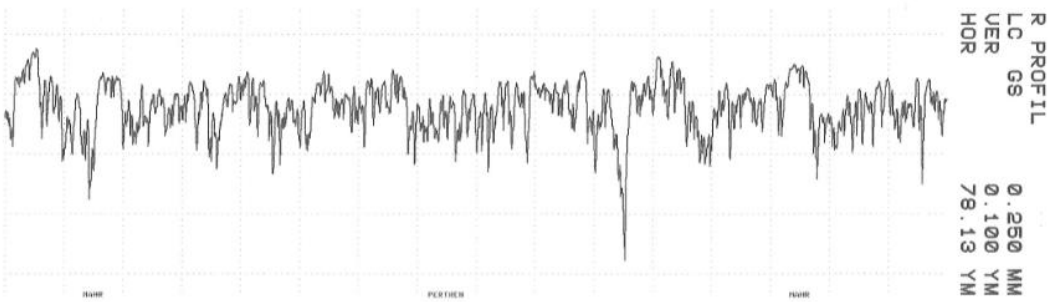


Slika 34. Profil hrapavosti i parametri uzorka P4 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P5 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.291	0.038	0.109	0.341	0.232		
2	RZ	YM	0.228	0.016	0.043	0.240	0.196		
3	RA	YM	0.032	0.003	0.007	0.034	0.027		
4	RP	YM	0.122	0.034	0.101	0.178	0.077		
5	RPM	YM	0.089	0.015	0.037	0.101	0.065		
6	WT	YM	0.077	0.015	0.037	0.102	0.065		
7	RT	YM	0.298	0.045	0.122	0.354	0.232		
8	PT	YM	0.326	0.049	0.144	0.411	0.267		



Slika 35. Profil hrapavosti i parametri uzorka P5 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

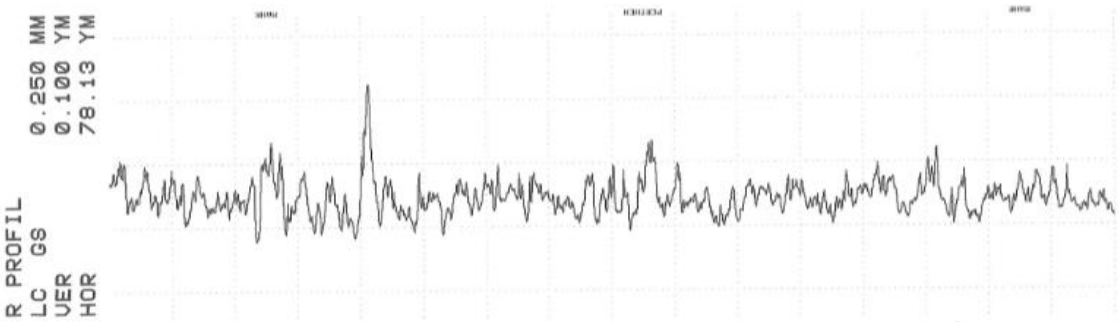
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:UZORAK P6

NR.:23.1.2020.
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.276	0.187	0.488	0.652	0.164		
2	RZ	YM	0.161	0.047	0.124	0.256	0.133		
3	RA	YM	0.020	0.003	0.008	0.025	0.018		
4	RP	YM	0.157	0.179	0.451	0.517	0.066		
5	RPM	YM	0.073	0.038	0.098	0.149	0.051		
6	WT	YM	0.090	0.032	0.091	0.150	0.059		
7	RT	YM	0.292	0.178	0.468	0.652	0.184		
8	PT	YM	0.319	0.210	0.545	0.745	0.200		

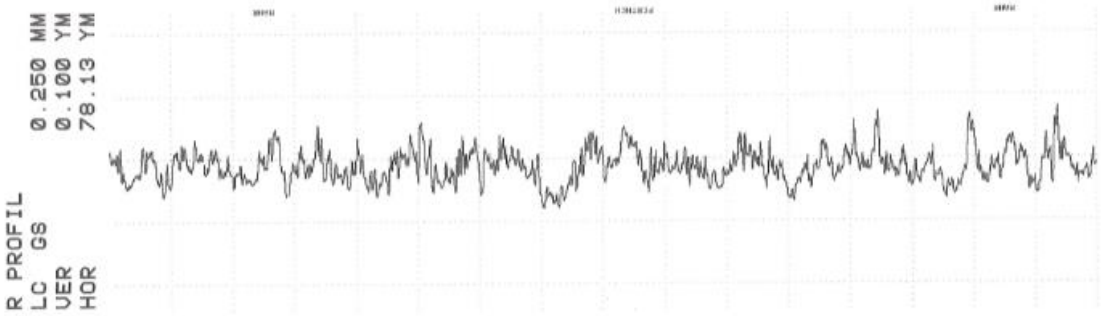


Slika 36. Profil hrapavosti i parametri uzorka P6 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P7 NR.:23.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.183	0.027	0.064	0.211	0.146		
2	RZ	YM	0.149	0.014	0.038	0.168	0.130		
3	RA	YM	0.023	0.002	0.005	0.024	0.020		
4	RP	YM	0.087	0.027	0.067	0.132	0.065		
5	RPM	YM	0.063	0.009	0.022	0.074	0.052		
6	WT	YM	0.105	0.050	0.135	0.183	0.048		
7	RT	YM	0.194	0.026	0.072	0.233	0.161		
8	PT	YM	0.252	0.051	0.119	0.301	0.182		

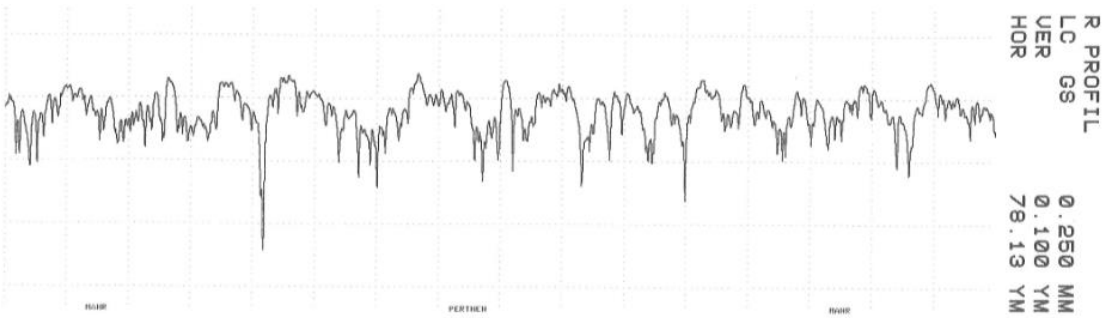


Slika 37. Profil hrapavosti i parametri uzorka P7 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P12 NR.:24.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.238	0.042	0.103	0.296	0.193		
2	RZ	YM	0.189	0.011	0.034	0.207	0.172		
3	RA	YM	0.027	0.002	0.006	0.031	0.024		
4	RP	YM	0.085	0.019	0.045	0.108	0.063		
5	RPM	YM	0.066	0.008	0.023	0.079	0.056		
6	WT	YM	0.069	0.029	0.080	0.122	0.042		
7	RT	YM	0.251	0.032	0.082	0.296	0.214		
8	PT	YM	0.275	0.029	0.079	0.316	0.237		

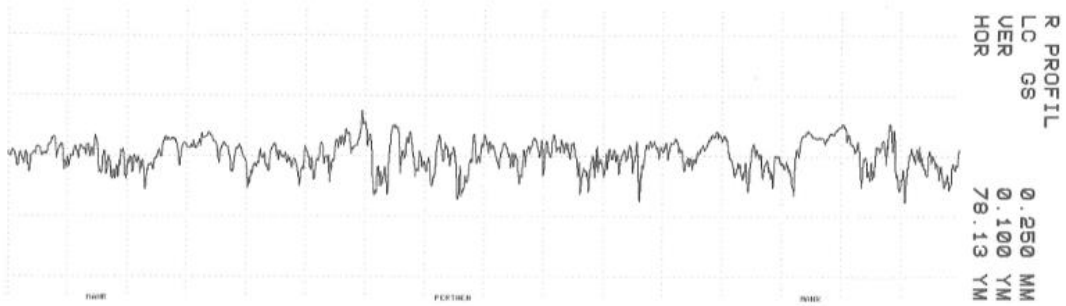


Slika 38. Profil hrapavosti i parametri uzorka P8 nakon elektropoliranja

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK P10 NR.:24.1.2020. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.172	0.040	0.111	0.251	0.140		
2	RZ	YM	0.137	0.015	0.037	0.157	0.121		
3	RA	YM	0.020	0.002	0.005	0.023	0.018		
4	RP	YM	0.076	0.011	0.033	0.098	0.065		
5	RPM	YM	0.057	0.008	0.021	0.070	0.050		
6	WT	YM	0.143	0.032	0.082	0.186	0.105		
7	RT	YM	0.182	0.045	0.117	0.269	0.151		
8	PT	YM	0.278	0.056	0.156	0.382	0.227		



Slika 39. Profil hrapavosti i parametri uzorka P9 nakon elektropoliranja