

# Primjena otisaka u području mjerenja hrapavosti

---

**Nujić, Bernard**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:847647>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bernard Nujić**

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing.

Student:

Bernard Nujić

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Gorani Baršić na stručnoj pomoći, pomoći pri prikupljanju literature, savjetima i uputama pri izradi rada te svima ostalima koji su na bilo koji način doprinijeli izradi istoga.

Bernard Nujić



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:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BERNARD NUJIĆ** Mat. br.: 0035202361

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena otisaka u području mjerenja hrapavosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of replica in the field of roughness measurement**

Opis zadatka:

Stanje površinske hrapavosti može u značajnoj mjeri utjecati na funkcionalne značajke proizvoda. U realnim proizvodnim uvjetima stanje hrapavosti najčešće se kvantificira primjenom elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom. Kada se ticalom mjernog uređaja ne može pristupiti mjernoj površini tada se s površine uzima otisak. Analizom parametara hrapavosti na otisku zaključuje se o stanju hrapavosti ispitne površine.

U radu je potrebno:

- Pregledom literature istražiti danas dostupne materijale za izradu otisaka te predložiti materijal koji je primjeren za kontakt metodu mjerenja.
- Na površinama obrađenim različitim obradama odvajanja čestica i različitih stanja hrapavosti provesti mjerenja parametara hrapavosti.
- Izuzeti otiske s površina mjerenih u prethodnoj točki i na tim otiscima provesti mjerenja parametara hrapavosti.
- Analizirati i komentirati ostvarene rezultate mjerenja s ciljem utvrđivanja prikladnosti primijenjenog materijala za izradu otisaka s obzirom na različite obrade i različita stanja hrapavosti.

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

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Gorana Baršić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
2. 2D MJERNI UREĐAJI S TICALOM.....	3
2.1. 2D mjerni uređaji s ticalom.....	3
2.2. Perthometer S8P.....	6
3. PARAMETRI HRAPAVOSTI.....	8
3.1. Hrapavost .....	8
3.2. Parametri hrapavosti .....	11
3.2.1. Parametar hrapavosti Ra .....	11
3.2.2. Parametar hrapavosti Rz .....	13
4. PREGLED LITERATURE.....	14
5. PREGLED REPLIKA .....	20
5.1. Replika Technovit 3040 .....	21
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	24
6.1. Provođenje mjerenja na uzorcima.....	25
6.1.1. Skupina A.....	28
6.1.2. Skupina B.....	34
6.1.3. Skupina C.....	39
6.2. Izrada kalupa za izljevanje.....	44
6.3. Priprema mase za otiske.....	50
6.4. Provođenje mjerenja otisaka .....	53
6.4.1. Skupina A.....	54
6.4.2. Skupina B.....	60
6.4.3. Skupina C.....	65
7. ANALIZA REZULTATA .....	70

---

8. ZAKLJUČAK.....	85
LITERATURA.....	87

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Konstrukcija 2D stylus uređaja [1].....	3
Slika 2.	Vrste vođenja [1] .....	5
Slika 3.	Perthometer S8P [1] .....	6
Slika 4.	Komponente profila [2] .....	8
Slika 5.	Prijenosne karakteristike profila hrapavosti [2] .....	9
Slika 6.	Karakteristične duljine 2D profila hrapavosti [2].....	10
Slika 7.	Srednja linija profila [2] .....	10
Slika 8.	Srednje aritmetičko odstupanje $Ra$ [2] .....	12
Slika 9.	Amplitudni parametar hrapavosti $Rz$ [4] .....	13
Slika 10.	Replika <i>Technovit 3040</i> [10] .....	21
Slika 11.	<i>Technovit</i> prah (lijevo) i <i>Technovit</i> univerzalna tekućina (desno) .....	22
Slika 12.	Pločica s uzorcima.....	25
Slika 13.	Uzorci skupine A.....	25
Slika 14.	Uzorci skupine B .....	26
Slika 15.	Uzorci skupine C .....	26
Slika 16.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-A.....	28
Slika 17.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-A.....	29
Slika 18.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-A.....	30
Slika 19.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (1. trag).....	32
Slika 20.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (3. trag).....	32
Slika 21.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (5. trag).....	32
Slika 22.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-A.....	33
Slika 23.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-B.....	34
Slika 24.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-B.....	35
Slika 25.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-B.....	36
Slika 26.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-B.....	37
Slika 27.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-B.....	38
Slika 28.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-C.....	39
Slika 29.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-C.....	40
Slika 30.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-C.....	41
Slika 31.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-C.....	42



Slika 32.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-C.....	43
Slika 33.	Dijelovi kalupa .....	44
Slika 34.	Ležište (donji dio kalupa).....	45
Slika 35.	Brtva postavljena na pločicu .....	46
Slika 36.	Okvir za izlivanje .....	47
Slika 37.	Poklopac kalupa .....	48
Slika 38.	<i>Technovit 3040</i> prah i <i>Technovit</i> univerzalna tekućina .....	50
Slika 39.	Oprema za miješanje i izlivanje mase .....	51
Slika 40.	Pločica s replikama.....	52
Slika 41.	Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-A .....	54
Slika 42.	Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-A .....	55
Slika 43.	Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-A .....	56
Slika 44.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (1. trag).....	58
Slika 45.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (3. trag).....	58
Slika 46.	Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (5. trag).....	58
Slika 47.	Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-A .....	59
Slika 48.	Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-B .....	60
Slika 49.	Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-B .....	61
Slika 50.	Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-B .....	62
Slika 51.	Dijagram profila hrapavosti otiska N8'-B .....	63
Slika 52.	Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-B .....	64
Slika 53.	Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-C .....	65
Slika 54.	Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-C .....	66
Slika 55.	Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-C .....	67
Slika 56.	Dijagram profila hrapavosti otiska N8'-C .....	68
Slika 57.	Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-C .....	69
Slika 58.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-A i otiska N2'-A.....	75
Slika 59.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-A i otiska N4'-A.....	75
Slika 60.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-A i otiska N6'-A.....	76
Slika 61.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (1. trag).....	76
Slika 62.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (3. trag).....	77
Slika 63.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (5. trag).....	77
Slika 64.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-A i otiska N10'-A.....	78

---

Slika 65.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-B i otiska N2'-B .....	78
Slika 66.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-B i otiska N4'-B .....	79
Slika 67.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-B i otiska N6'-B .....	79
Slika 68.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-B i otiska N8'-B .....	80
Slika 69.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-B i otiska N10'-B .....	80
Slika 70.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-C i otiska N2'-C .....	81
Slika 71.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-C i otiska N4'-C .....	81
Slika 72.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-C i otiska N6'-C .....	82
Slika 73.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-C i otiska N8'-C .....	82
Slika 74.	Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-C i otiska N10'-C .....	83
Slika 75.	Zračni mjehuri unutar replike.....	84

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike uređaja Perthometer S8P [1].....	7
Tablica 2. Referente vrijednosti norme ISO 4288:1996 [11].....	27
Tablica 3. Parametri mjerenja uzorka N2-A .....	28
Tablica 4. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N2-A .....	28
Tablica 5. Parametri mjerenja uzorka N4-A .....	29
Tablica 6. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N4-A .....	29
Tablica 7. Parametri mjerenja uzorka N6-A .....	30
Tablica 8. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N6-A .....	30
Tablica 9. Parametri mjerenja uzorka N8-A .....	31
Tablica 10. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N8-A .....	31
Tablica 11. Parametri mjerenja uzorka N10-A .....	33
Tablica 12. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N10-A .....	33
Tablica 13. Parametri mjerenja uzorka N2-B.....	34
Tablica 14. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N2-B .....	34
Tablica 15. Parametri mjerenja uzorka N4-B.....	35
Tablica 16. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N4-B .....	35
Tablica 17. Parametri mjerenja uzorka N6-B.....	36
Tablica 18. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N6-B .....	36
Tablica 19. Parametri mjerenja uzorka N8-B.....	37
Tablica 20. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N8-B .....	37
Tablica 21. Parametri mjerenja uzorka N10-B.....	38
Tablica 22. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N10-B .....	38
Tablica 23. Parametri mjerenja uzorka N2-C.....	39
Tablica 24. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N2-C .....	39
Tablica 25. Parametri mjerenja uzorka N4-C.....	40
Tablica 26. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N4-C .....	40
Tablica 27. Parametri mjerenja uzorka N6-C.....	41
Tablica 28. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N6-C .....	41
Tablica 29. Parametri mjerenja uzorka N8-C.....	42
Tablica 30. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N8-C .....	42
Tablica 31. Parametri mjerenja uzorka N10-C.....	43

Tablica 32. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za uzorak N10-C .....	43
Tablica 33. Parametri mjerenja otiska N2'-A .....	54
Tablica 34. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N2'-A.....	54
Tablica 35. Parametri mjerenja otiska N4'-A .....	55
Tablica 36. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N4'-A.....	55
Tablica 37. Parametri mjerenja otiska N6'-A .....	56
Tablica 38. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N6'-A.....	56
Tablica 39. Parametri mjerenja uzorka N8'-A.....	57
Tablica 40. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N8'-A.....	57
Tablica 41. Parametri mjerenja otiska N10'-A .....	59
Tablica 42. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N10'-A.....	59
Tablica 43. Parametri mjerenja otiska N2'-B .....	60
Tablica 44. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N2'-B .....	60
Tablica 45. Parametri mjerenja otiska N4'-B .....	61
Tablica 46. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N4'-B .....	61
Tablica 47. Parametri mjerenja otiska N6'-B .....	62
Tablica 48. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N6'-B .....	62
Tablica 49. Parametri mjerenja otiska N8'-B .....	63
Tablica 50. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N8'-B .....	63
Tablica 51. Parametri mjerenja otiska N10'-B .....	64
Tablica 52. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N10'-B .....	64
Tablica 53. Parametri mjerenja otiska N2'-C .....	65
Tablica 54. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N2'-C .....	65
Tablica 55. Parametri mjerenja otiska N4'-C .....	66
Tablica 56. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N4'-C .....	66
Tablica 57. Parametri mjerenja otiska N6'-C .....	67
Tablica 58. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N6'-C .....	67
Tablica 59. Parametri mjerenja otiska N8'-C .....	68
Tablica 60. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N8'-C .....	68
Tablica 61. Parametri mjerenja otiska N10'-C .....	69
Tablica 62. Vrijednosti parametara $R_a$ i $R_z$ za otisak N10'-C.....	69
Tablica 63. Usporedba aritmetičkih sredina uzoraka i otisaka.....	70
Tablica 64. Raspon dobivenih rezultata za parametar $R_a$ .....	71

---

Tablica 65. Raspon dobivenih rezultata za parametar $R_z$ .....	71
Tablica 66. Apsolutne razlike vrijednosti rezultata mjerenja.....	73
Tablica 67. Relativne razlike vrijednosti rezultata mjerenja.....	73

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
<i>Ra</i>	nm, $\mu\text{m}$	Srednje aritmetičko odstupanje profila
<i>Rz</i>	nm, $\mu\text{m}$	Najveća visina profila unutar referentne dužine
$\lambda_c, \lambda_f$	mm	Granične vrijednosti filtra
<i>Sa</i>	$\mu\text{m}$	Aritmetička sredina visine površine
<i>U</i>	nm	Proširena mjerna nesigurnost
<i>r</i>	$\mu\text{m}$	Radijus ticala
<i>F</i>	mN	Mjerna sila ticala
$\Delta Ra$	$\mu\text{m}$	Apsolutna razlika vrijednosti parametra <i>Ra</i>
$\Delta Rz$	$\mu\text{m}$	Apsolutna razlika vrijednosti parametra <i>Rz</i>
<i>R(Ra)</i>	$\mu\text{m}$	Relativna razlika vrijednosti parametra <i>Ra</i>
<i>R(Rz)</i>	$\mu\text{m}$	Relativna razlika vrijednosti parametra <i>Rz</i>

## SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisani su elektroničko-mehanički uređaji s ticalom, čija je svrha mjerenje površinske hrapavosti. Uz opći opis spomenute skupine uređaja, izdvojen je uređaj *Perthometer S8P* na kojem su se provodila mjerenja za potrebe eksperimentalnog dijela rada. Potom se definira pojam hrapavosti površine kao i 2D parametri istog. Prilikom definiranja hrapavosti površine i 2D parametara, izdvojeni su i pobliže opisani 2D parametri površinske hrapavosti koji su se mjerili u eksperimentalnom dijelu,  $R_a$  i  $R_z$ .

U nastavku, prikazan je pregled literature iz raznih izvora s temom primjene otisaka u području mjerenja hrapavosti. Glavni cilj ovog dijela rada je prikupljanje podataka i povratnih informacija o analizama spomenute metode mjerenja. Uz analize pokusa, dobivene su i povratne informacije za pravilan odabir vrste replike koja će u konačnici služiti za uzimanje otisaka površine uzoraka tokom eksperimentalnog dijela rada. Nakon pregleda literature, slijedi pregled najčešće spomenutih i korištenih replika te sužavanje izbora na repliku najpogodniju za metodu mjerenja hrapavosti primjenom otisaka. Naposljetku, odabrana je replika detaljnije opisana.

Eksperimentalni dio rada baziran je na mjerenju površinske hrapavosti odabranih uzoraka i njihovih replika. Površine replika predstavljaju otiske zrcaljenih površina uzoraka. Odabrane su tri skupine strojne obrade iz kojih je izdvojeno po pet uzoraka. Na svakom uzorku provedeno je pet mjerenja, a dobiveni su rezultati uspoređeni, analizirani te grafički prikazani.

Ključne riječi: hrapavost, parametri hrapavosti, 2D uređaji s ticalom, replika

## SUMMARY

The introductory part of the paper describes the electronic-mechanical devices called 2D stylus devices, whose main purpose is measuring surface roughness. Alongside general description of said devices, Perthometer S8P is described individually and in more details because it was used for the experimental part of the paper. Afterwards, the term surface roughness and the 2D roughness parameters are defined. In that chapter, 2D roughness parameters  $Ra$  and  $Rz$  were described in detail since those were the measured parameters during the experimental part.

Next was given a brief review of the literature from different sources whose thesis is application of replica in the field of roughness measurement. Main purpose of this part of the paper is gathering data and information about analysis of said measuring method. Alongside experiment analysis, information for the correct choice of the replica material type which will be used for the surface replication of the chosen samples was gathered. After a review of the literature, a review of the most mentioned and used replicas is given, which resulted in the selection of a replica that is the most compatible for a measuring method in the experimental part of the paper. Also, detailed description of the chosen replica was given.

The experimental part of the paper was based on measuring the surface roughness of chosen samples and their replicas. Replicas' surfaces present the prints of the mirrored sample surfaces. Three types of machining processes were chosen from which were taken five samples each. On every sample was made five measurements and the results were compared, graphically shown and analyzed.

Key words: roughness, roughness parameters, 2D stylus devices, replica



## 1. UVOD

U današnjoj industriji kvaliteta obrađene površine ima značajan utjecaj na konačnu kvalitetu proizvoda. Upravo zato postoje razne strojne obrade kako bi se postigle tražene teksture površina. Strojnom obradom utječe se na svojstva i kvalitetu površine. Naprimjer, ukoliko se radi o nekvalitetnoj ili krivo odabranoj obradi, može doći do povećanja trenja što uzrokuje veće trošenje i kraći životni vijek proizvoda. Stoga je važno znati stvarno stanje površine, a ono se dobije putem mjerenja određenih parametara, poput parametara hrapavosti površine. Hrapavost pripada komponentama teksture, odnosno fine nepravilnosti površine. Postoje četiri skupine parametara hrapavosti: amplitudni, uzdužni, hibridni i parametri s krivulje nosivosti profila. U eksperimentalnom dijelu ovog rada mjereni su i praćeni 2D parametri  $R_a$  i  $R_z$  koji pripadaju skupini amplitudnih parametara.  $R_a$  prikazuje podatke o aritmetičkoj sredini apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije, dok parametar  $R_z$  o najvećoj visini profila unutar referentne dužine. [1]

U mjeriteljstvu postoje različiti uređaji za mjerenje stanja površine pa tako i hrapavosti. Jedna od najčešćih metoda je korištenje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom. Razlikujemo 2D i 3D uređaje, a u ovom radu korištena je metoda mjerenja površinske hrapavosti 2D uređajem s ticalom. Princip rada ovih uređaja temelji se na mjerenju profila površine. Radi se o kontaktnoj metodi gdje igla ticala uređaja prolazi po površini uzorka. Vertikalni pomaci igle preko pretvornika pretvaraju se u električne signale putem kojih se daljnim procesom dobiju povratne informacije o stanju površinske hrapavosti. Uz brojčane vrijednosti prethodno spomenutih parametara  $R_a$  i  $R_z$ , profil površine prikazuje se i putem dijagrama za vizualni prikaz. Za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada korišten je uređaj Perthometer S8P. [1]

Često se u industriji može dogoditi da je potrebno provjeriti stanje površine dijelova koji su možda nedostupni ili teško dostupni za direktno mjerenje. Uglavnom je riječ o površinama dijelova čija je demontaža komplicirana, imaju preveliku masu da bi se prenijeli u laboratorij ili njihovo rastavljanje oduzima puno vremena te zahtjeva puno rada. U takvim situacijama, koriste se indirektno metode mjerenja hrapavosti kao što je uzimanje otiska površine koristeći razne smjese i materijale za replikaciju. Otisci ili replike nanose se direktno na površinu čija se hrapavost želi izmjeriti.

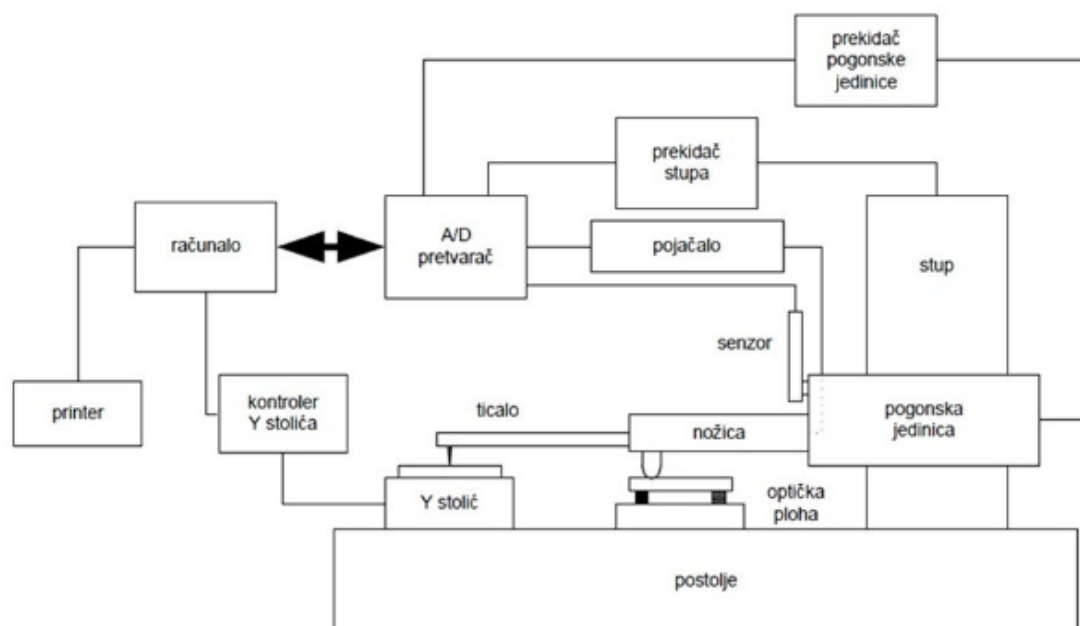
Nakon sušenja, otisak se odnosi na prikladan uređaj za mjerenje gdje daje zrcaljeni profil (negativ) mjerene površine. Ovisno o metodi mjerenja hrapavosti, koriste se različite smjese i materijali za replikaciju. Uz karakteristike materijala poput točnosti repliciranja i slično, bitno je znati da li se radi o kontaktnoj ili beskontaktnoj metodi mjerenja kako bi se odabrao materijal prikladne tvrdoće. Tako je za ovaj rad odabrana kontaktna metoda mjerenja hrapavosti korištenjem 2D uređaja s ticalom, a na temelju toga izabran je dvokomponentni polimer *Technovit 3040* kao smjesa za uzimanje otiska.

## 2. 2D MJERNI UREĐAJI S TICALOM

### 2.1. 2D mjerni uređaji s ticalom

Jedna od najčešćih metoda mjerenja hrapavosti površine danas predstavlja mjerenje pomoću 2D uređaja s ticalom. Kod ovog tipa uređaja, ticalo s iglom na vrhu prelazi preko površine uzorka u jednom smjeru prilikom čega bilježi visinu i duljinu profila.

Svaki 2D uređaj s ticalom sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova: ticala, sonde, pretvornika, pogona i postolja [Slika 1].



Slika 1. Konstrukcija 2D stylus uređaja [1]

Direktni kontakt s površinom uzorka daje ticalo. Ono je sondom na kojoj se nalazi nožica povezano za pogon uređaja (step, linearni motor) koji ticalo povlači konstantom brzinom u smjeru osi X. Prilikom povlačenja, vrh ticala (igla) bilježi vertikalne pomake koji se putem pretvornika pretvaraju u električne signale i šalju na računalo. Pretvornici mogu biti induktivni, piezoelektrični i optički. Računalo nakon primanja signala daje vrijednosti određenih parametara izmjerenog profila hrapavosti i dijagram za vizualni prikaz profila. Obzirom da se ticalo kreće, radi se o dinamičkom načinu mjerenja. Računalo također predstavlja i upravljačku jedinicu mjernog uređaja kojom se prati, upravlja i kontrolira proces mjerenja. Ujedno je važno spomenuti kako mora postojati referentna površina za vođenje ticala, a ona može biti u obliku nožice ili ravnine. [1]

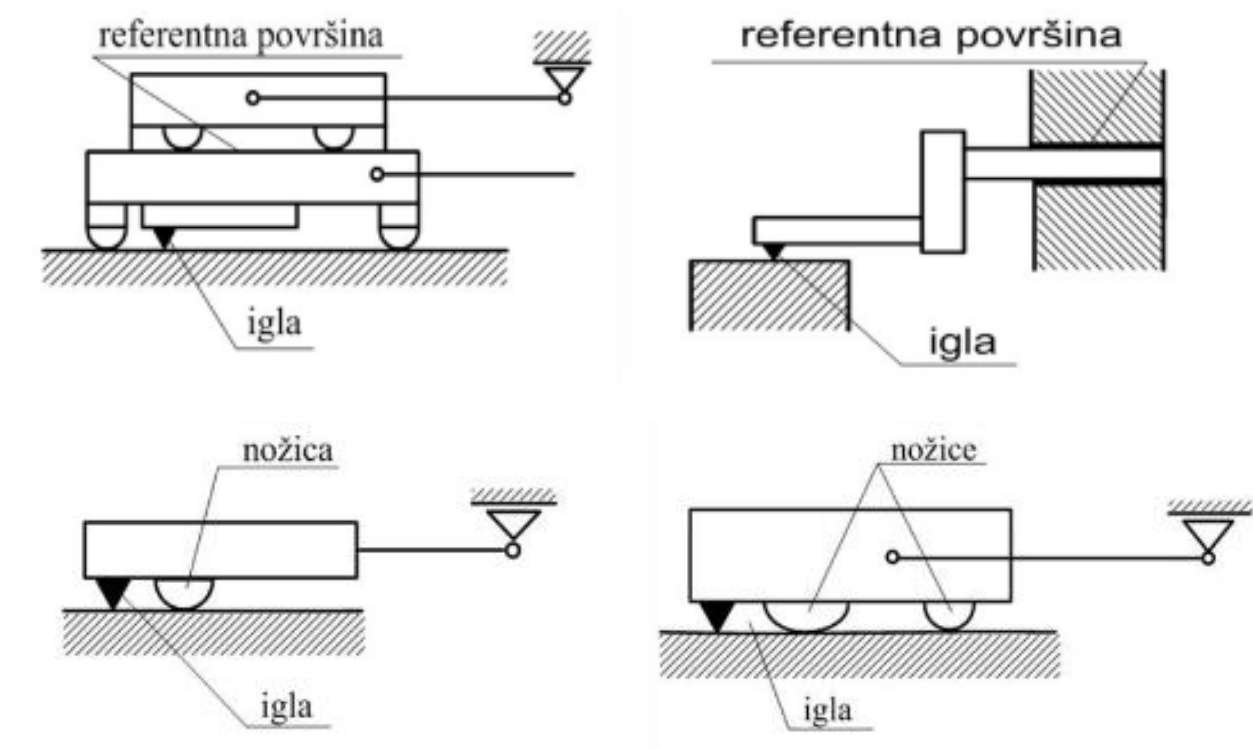
Vrh ticala ima piramidalni ili stožasti oblik, a najčešće je napravljen od dijamanta ili safira radi specifičnih svojstava tih materijala. Zbog karakterističnog oblika, vrh ticala ima određena ograničenja. Dolovi na površini mjerenog uzorka čije su dimenzije manje od dimenzije radijusa vrha ticala često ostaju nezabilježeni. Uz spomenuto ograničenje, vrlo je važno i pripaziti na mjerne sile ticala tijekom procesa mjerenja kako se ne bi dogodilo oštećenje površine mjerenog uzorka ili samog vrha ticala. Norma ISO 3274:1996 definira tehničke karakteristike idealnog oblika vrha ticala. Radi se o stošcu zaobljenog vrha s nazivnim dimenzijama:

- radijus vrha: 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ili 10  $\mu\text{m}$
- kut: 60° ili 90° (ukoliko nije specificirano, primjenjuje se 60°)

Potrebno je posvetiti pažnju i mogućim pogreškama prilikom mjerenja. Postoje tri vrste pogrešaka kod mjerenja koristeći uređaj s ticalom, a uz njih postoji i mogućnost pogrešaka zbog načina vođenja. Spomenute tri vrste pogrešaka su:

1. pogreške zbog radijusa ticala
2. pogreške zbog izvedbe referentne površine
3. pogreške zbog krivo odabrane *cut-off* vrijednosti

Kao što je rečeno, način vođenja također može uzrokovati pogreške stoga postoje dvije pravilne vrste vođenja: vanjsko vođenje i vođenje nožicom, kako prikazuje Slika 2. [1]



## 2.2. Perthometer S8P

Za potrebe izvođenja eksperimentalnog dijela rada, koristio se elektroničko-mehanički uređaj s ticalom naziva *Perthometer S8P* [Slika 3].



**Slika 3. Perthometer S8P [1]**

Spomenuti uređaj koristi kontaktnu metodu mjerenja površinske hrapavosti, a njegovo umjeravanje provodi se prema vodiču DKD-R 4-2: *Calibration of measuring instruments and standards for roughness measuring technique*. *Perthometer S8P* pripada skupini 2D uređaja s ticalom te je njegov proizvođač tvrtka *Feinprüf Perthen GmbH*, Njemačka. Tablica 1. prikazuje tehničke karakteristike uređaja. [1]

Tablica 1. Tehničke karakteristike uređaja Perthometer S8P [1]

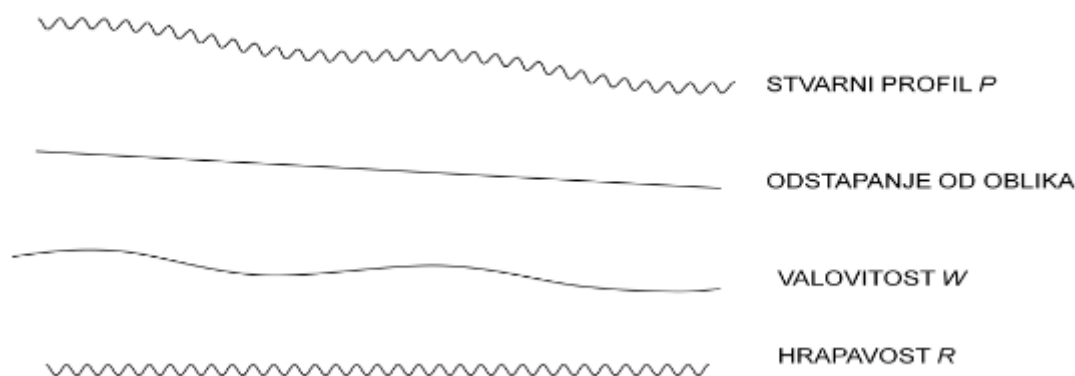
<b>Proizvođač</b>	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
<b>Tragovi</b>	4 – 128; 8064 točaka po tragu
<b>Duljina očitavanja [mm]</b>	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
<b>Standardni mjerni putevi [mm]</b>	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
<b>Mjerni opseg [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	$\pm 12,5$ ; $\pm 62,5$ ; $\pm 125$ ; $\pm 625$ ; $\pm 2500$
<b>Cut-off (granične valne dužine) [mm]</b>	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
<b>Tip filtera</b>	- Gaussov filter - RC filter
<b>Profili</b>	<i>D</i> – direktni <i>G</i> – ispravljeni <i>P</i> – ispravljen bez početnog i završnog dijela <i>W</i> – valovitosti <i>R</i> – hrapavosti

### 3. PARAMETRI HRAPAVOSTI

#### 3.1. Hrapavost

Osnovni pojmovi i definicije u mjeriteljstvu zadani su normom HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010: *Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Nazivlje, definicije i parametri teksture površine – Amandman 1: broj izbočina (ISO: 4287:1997/Amd 1:2009; EN ISO 4287:1998/A1:2009)*. [2]

U ovom radu naglasak je na 2D mjerenjima hrapavosti površina. Unatoč raznim prednostima 3D mjerenja, 2D mjerenja još uvijek su najčešća metoda zbog jeftinije opreme i boljoj sljedivosti rezultata. Prilikom procesa mjerenja 2D parametara hrapavosti površine koriste se već spomenuti elektroničko-mehanički uređaji s ticalom pomoću kojih se snima primarni profil. Svaki primarni profil sastoji se od tri komponente: odstupanje od oblika, valovitost i hrapavost. [2]

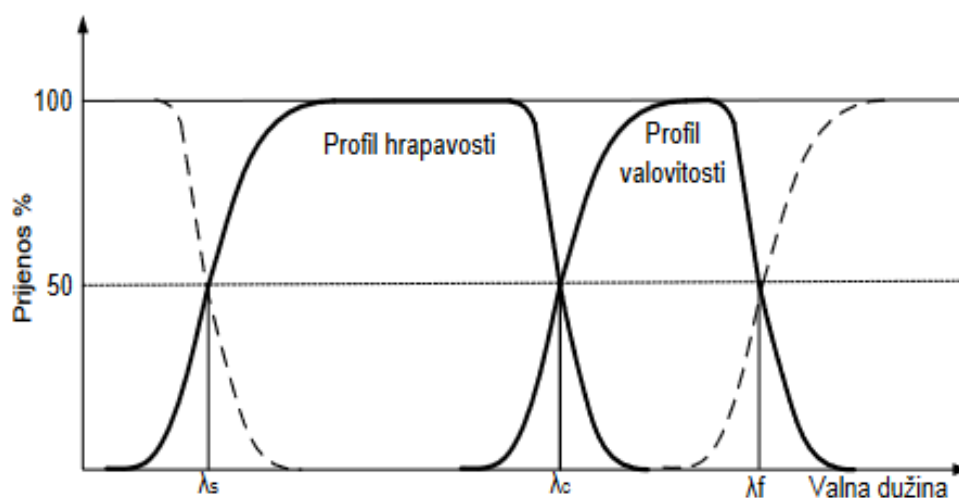


Slika 4. Komponente profila [2]

Hrapavost je posljedica proizvodnog procesa. Definira se kao rezultat nepravilnosti na površini što je posljedica postupka obrade. Ne uključuje valovitost, odstupanje od oblika i površinske greške. Ono što hrapavost uključuje su kratkovalne nepravilnosti površine i kvantificira se vertikalnim odstupanjima stvarne površine od njenog idealnog oblika. [2]



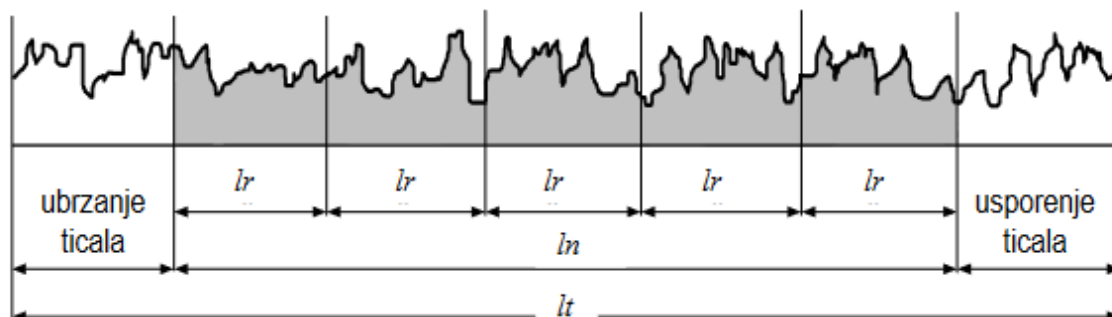
Kod postupka mjerenja hrapavosti površina, potrebno je znati nekoliko važnih pojmova. Svaka površina ima svoj profil što je zapravo presjek realne površine s određenom ravninom. Odvajanje komponenti profila provodi se primjenom profilnog filtra hrapavosti  $\lambda_c$  i profilnog filtra valovitosti  $\lambda_f$ . Spomenuti filtri pripadaju procesu zvanom filtriranje što je zapravo odvajanje određenih komponenti frekvencija. Za izdvajanje hrapavosti, kod postupka filtriranja propuštaju se komponente kratkih valnih duljina (visoke frekvencije). [2]



Slika 5. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti [2]

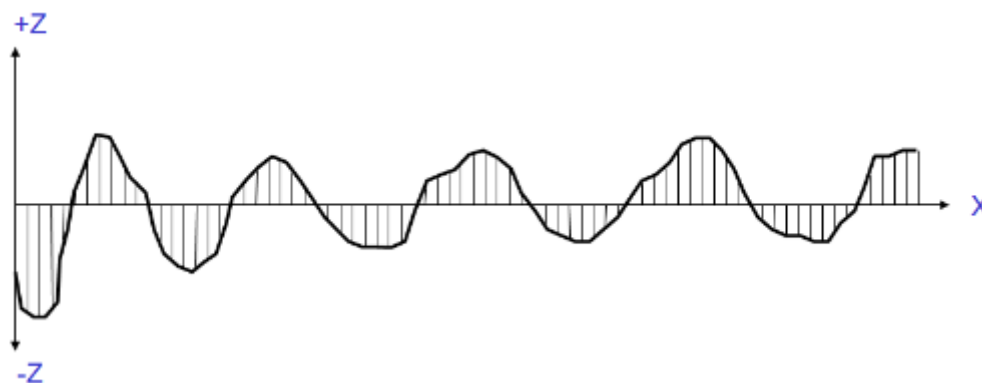
Još jedan bitan pojam je takozvani *cut-off*. On predstavlja granične vrijednosti filtra  $\lambda_c$  koje numerički određuju graničnu frekvenciju. Sve komponente izvan tih frekvencija su izdvojene ili eliminirane. Preporučene vrijednosti mogu se pronaći u normi ISO 4288:1996 *Geometric Product Specification (GPS) – Surface texture: profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture*, koja je ujedno korištena u eksperimentalnom dijelu ovog rada. [2]

Prilikom ispitivanja hrapavosti površine postoje specifične duljine i srednja linija profila. Karakteristične duljine su: duljina ispitivanja  $l_t$ , duljina vrednovanja  $l_n$  te referentna duljina  $l_r$  koja je iznosom jednaka graničnoj vrijednosti filtra  $\lambda_c$  [Slika 6]. [2]



Slika 6. Karakteristične duljine 2D profila hrapavosti [2]

Srednja linija profila [Slika 7] je referentna linija koja služi za izračun parametara, a definira se za primarni profil, profil hrapavosti i profil valovitosti. Za hrapavost, srednja linija profila određuje se uz primjenu profinog filtra  $\lambda_c$ . [2]



Slika 7. Srednja linija profila [2]

### 3.2. Parametri hrapavosti

U mjeriteljstvu postoje određeni parametri koji se prate prilikom izvođenja postupka mjerenja. Oni se definiraju i računaju ovisno o vrsti profila, a postoje tri prefiksa koji označavaju vrstu profila. Svaki prefiks je prvo slovo simbola i oni su [2]:

- $R$  – prefiks parametra hrapavosti
- $W$  – prefiks parametra valovitosti
- $P$  – prefiks parametra primarnog profila

Parametri profila površine za 2D mjerni sustav podijeljeni su u četiri skupine: amplitudni, uzdužni, hibridni, te krivuljni i srodni. Za potrebe eksperimentalnog dijela rada izdvojeni su parametri hrapavosti koji pripadaju skupini amplitudnih. Ova skupina parametra opisuje varijacije po visini profila, a praćeni parametri prilikom izvođenja pokusa su  $Ra$  i  $Rz$ . [2]

#### 3.2.1. Parametar hrapavosti $Ra$

Parametar hrapavosti  $Ra$  [Slika 8] prikazuje aritmetičku sredinu apsolutnih vrijednosti odstupanja profila hrapavosti od srednje linije. On je ujedno i najčešće korišten parametar hrapavosti. [2]

Vrijednost parametra  $Ra$  ne pruža informacije o obliku nepravilnosti na površini uzorka te je moguće dobiti slične vrijednosti za potpuno različite profile površine, stoga je vrlo korisno znati o kojem se postupku obrade površine radi. [3]

$Ra$  se može matematički izraziti preko sljedeće jednadžbe:

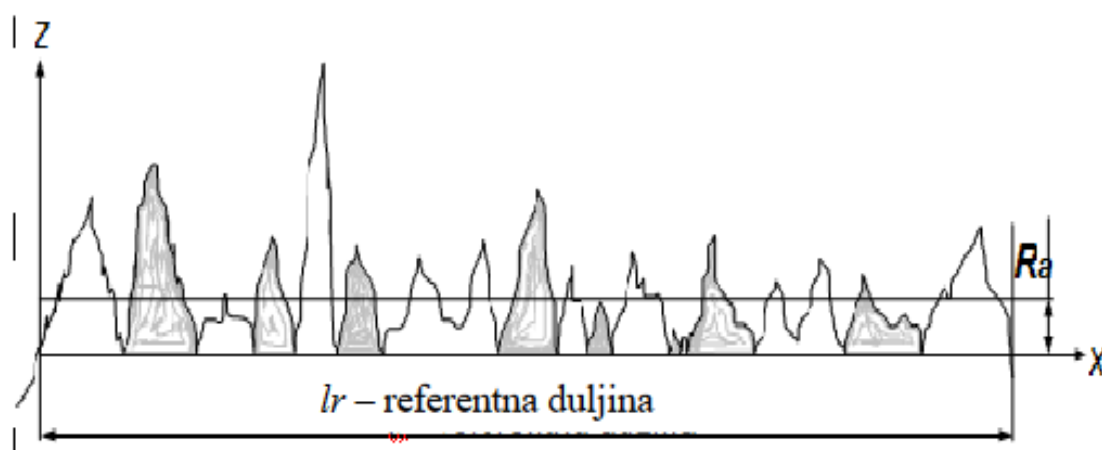
$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (1)$$

gdje je:

$Ra$  – srednje aritmetičko odstupanje profila, [ $\mu\text{m}$ ]

$lr$  – referentna duljina, [mm]

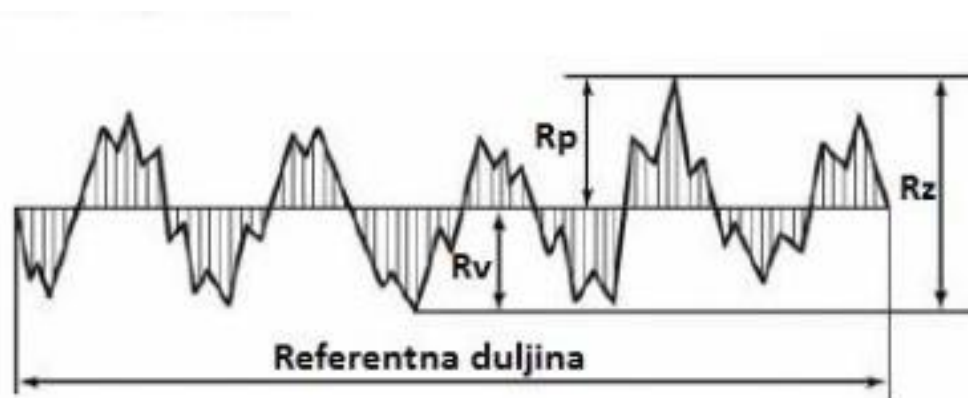
$Z(x)$  – visina profila hrapavosti obzirom na referentnu liniju, [ $\mu\text{m}$ ]



Slika 8. Srednje aritmetičko odstupanje  $Ra$  [2]

### 3.2.2. Parametar hrapavosti $R_z$

Drugi izdvojeni parametar hrapavosti je  $R_z$  koji također pripada skupini amplitudnih parametara. Parametar  $R_z$  [Slika 9] predstavlja najveću visinu profila unutar referentne dužine, a dobije se zbrojem najveće visine vrha  $R_p$  i najveće dubine dola  $R_v$  profila hrapavosti. [2]



Slika 9. Amplitudni parametar hrapavosti  $R_z$  [4]

#### 4. PREGLED LITERATURE

U ovom poglavlju rada pružen je pregled literature iz raznih izvora unutar koje je obrađivana tema primjene otiska u području mjerenja hrapavosti. Izdvojeno je nekoliko znanstvenih radova koji su pružili razne važne informacije i podatke dobivenih putem izvođenja određenih eksperimenata. U konačnici, ti podaci iskorišteni su za pravilan odabir materijala replike koja će se koristiti, te za kvalitetniju izvedbu mjerenja u eksperimentalnom dijelu rada.

Znanstveni rad naziva „*On the application of replica molding technology for the indirect measurement of surface and geometry of micromilled components*“ čiji su autori F. Baruffi, P. Parenti, F. Cacciatore, M. Annoni i G. Tosello, kao temu ima primjenu otisaka kod površina obrađenih mikrogodanjem koje se nalaze na mjestima nedostupnim standardnim mjernim uređajima. Glavni cilj pokusa je istražiti kvalitetu repliciranja komercijalnih materijala za uzimanje otisaka koristeći indirektnu metodu mjerenja površine. Glavne karakteristike površine preko kojih se određivala točnost repliciranja su geometrija i tekstura. Mjerenja su izvedena pomoću 3D konfokalnog mikroskopa i uređaja na principu varijacije fokusa. [5]

Za potrebe eksperimentalnog dijela rada, izrađena su i obrađena dva različita uzorka. Prvi je uzorak za procjenu ponašanja otiska i kvalitetu replikacije površine na temelju mjerenja hrapavosti. Drugi uzorak izrađen je u svrhu prikazivanja sposobnosti otiska ukoliko se koristi indirektno mjerenje geometrije površine. Za izradu uzoraka korišteni su nehrđajući čelici, kaljeni AISI 440 i žareni AISI 440. Razlog odabira ovih nehrđajućih čelika leži u tome što predstavljaju prikladan izbor za kalupnu proizvodnju te se očekuje kako će osigurati dvije različite teksture površine na temelju različitih svojstava, kao što su tvrdoća, veličina zrna strukture i specifična sila rezanja. [5]

Što se tiče odabira materijala replike, autori ovog rada odlučili su se za crnu dvokomponentnu silikonsku gumu. Odabir materijala temeljio se na iscrpnom istraživanju prijašnjih znanstvenih radova s istom tezom. Rezultati istraživanja pokazali su da za potrebe površinskih i dimenzionalnih mjerenja najpogodniji materijali na silikonskoj bazi zbog minimalnog utjecaja na dimenzije prilikom stezanja pri širokom rasponu temperatura. Primjena ove replike provodila se uz upute dane od strane proizvođača te korištenjem prikladnog pištolja za nanošenje. Nakon primjene replike na uzorak, slijedi otvrdnjavanje na sobnoj temperaturi. Kako bi se procijenilo i svojstvo ponovljivosti ove replike, postupak je ponovljen tri puta za svaki uzorak. [5]

Za postupak mjerenja hrapavosti površine korišten je 3D konfokalni mikroskop (*MarSurf CMW 100, Mahr GmbH, Göttingen, Njemačka*). Cilj mjerenja je okarakterizirati određeni dio teksture površine na uzorcima, stoga je sa svakog uzorka izdvojena pravokutna površina dimenzija  $1,0 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ . Praćeni parametar prilikom postupka mjerenja je aritmetička sredina visine površine  $Sa$ . Spomenuti parametar opisuje apsolutnu vrijednost razlike u visini svake mjerene točke uspoređujući ih s aritmetičkom sredinom odstupanja površine. Parametar  $Sa$  pripada skupini 3D parametara hrapavosti površine. Razlog odabira ovog parametra je minimalan utjecaj lokalnih nepravilnosti na njega. Za postupak mjerenja dimenzijskih karakteristika korišten je optički mikroskop s varijacijom fokusa (*InfiniteFocus, Alicona Imaging GmbH, Raaba, Austria*). Cilj mjerenja ovim uređajem je prikazivanje podudarnosti mikrogeometrije uzoraka i replika. [5]

Rezultati eksperimentalnog dijela ovog znanstvenog rada pokazali su kako silikonske replike pružaju preciznu reprodukciju površinske hrapavosti uzoraka te blisku sličnost izgleda površine. Prilikom očitavanja podataka, vrijednosti standardnih devijacija otisaka demonstrirale su dobru ponovljivost ovog materijala prilikom repliciranja. Postupak je također potvrdio usporedive rezultate parametra  $Sa$ . Rezultati geometrijskih mjerenja prikazuju da replike imaju vrlo slične dimenzije i oblik u odnosu na uzorke. Nije bilo utjecaja stezanja na dimenzijsku postojanost i odstupanja od oblika. [5]

Znanstveni rad „*The replication method to analyze roughness of shaft, tool and grinding wheel microgeometry*“ autora P. Szawara i R. Ostrowski, također obrađuje temu primjene otisaka u području mjerenja parametara površine. Međutim, cilj ovog rada je testiranje određenog proizvoda za repliciranje, *RepliSet F5*, na temelju parametara hrapavosti *Ra* i *Rz* površine osovine, mikroteometrije alata za zavarivanje trenjem te poroznosti brusne ploče. [6]

Eksperimentalni dio sastoji se od nekoliko koraka koji nisu uvelike različiti od onih u pokusu prethodnog rada. Odabrana je replika *RepliSet F5* (dvokomponentna silikonska guma) tvrtke *Struers*, a mjerenja su provedena na mikroskopu s varijacijom fokusa *Alicona InfiniteFocus G4*, izuzevši parametre hrapavosti koji su mjereni profilometrom *Mahr Marsurf M400*. Postupak izvođenja eksperimenta svodio se na pripremu površina uzoraka, njihovo čišćenje i odmašćivanje, te apliciranje replike na iste. *RepliSet F5* zahtjeva vremenski period otvrdnjavanja od 18 minuta nakon čega se može ukloniti s površine uzorka te prenijeti na mjerni uređaj. [6]

Rezultati prvog dijela eksperimenta pokazali su da spomenuta replika nije pogodna za postupke mjerenja poroznosti materijala. Razlog tome temelji se na velikoj viskoznosti i fluidnosti replike što uzrokuje da ona prodire preduboko u pore i time utječe na rezultate. Mjerenje parametara hrapavosti površine osovine pokazalo je da prosječne vrijednosti rezultata variraju. Varijacije mogu biti uzrokovane različitim faktorima kao što su ljudska pogreška, oštećenja mjerene površine i slično, no u ovom slučaju postoji mogućnost krivo izabrane testne površine. Unatoč tome, vrijednosti dobivenih rezultata dokazuju kako je *RepliSet F5* pogodan za mjerenje hrapavosti površine koristeći kontaktnu metodu. Naposljetku, treći dio eksperimenta temeljio se na repliciranju mikroteometrije. Prikupljeni podaci pokazuju da je mikroteometrija alata za zavarivanje trenjem replicirana u točnosti do 10  $\mu\text{m}$ , na temelju čega se može zaključiti da je replika *RepliSet F5* pogodna za replikaciju geometrije površine te mjerenje istog. [6]



Sljedeći izdvojeni znanstveni rad naziva je „*Measuring surface roughness: three techniques*“, autora A. E. Charola, C. A. Grissom, E. Evin, M. J. Wachowiak i D. Oursler. U ovom radu obrađena je tema usporedbe tri metode mjerenja površinske hrapavosti kamena kako bi se ustanovili rasponi tih metoda u ovom području. Izabrane metode su mjerenje uređajem s ticalom, profilometrija laserskom triangulacijom te analiza slike reflektirane svjetlosti. [7] Za potrebe ovog diplomskog rada, prilikom pregleda literature naglasak je bio na korištenim materijalima replika, a ponajviše na replikama korištenim za mjerenje uređajima s ticalom.

Replika korištena za potrebe eksperimentalnog dijela je guma na silikonskoj bazi *Dow Corning*. U radu se navodi kako je repliciranje površine kamena bilo iznimno detaljno i kvalitetno, no korištenje tehnike mjerenja uređajem s ticalom rezultiralo je nezadovoljavajućim podacima. Međutim, dobiveni rezultati dobiveni su korištenjem neprikladne metode mjerenja hrapavosti za takav tip površine, porozne s dubokim brazdama. U konačnici, zaključak koristan za potrebe ovog diplomskog rada je kako se ponavlja korištenje materijala na silikonskoj bazi. Sposobnost repliciranja površine ovih materijala pokazuje se kvalitetnom te pogodnom za kontaktno mjerenje hrapavosti. [7]

Posljednji izdvojeni znanstveni rad je autora Y.C. Liu, C.Y. Ling, A.A. Malcom i Z.G. Dong pod nazivom „*Accuracy of replication for non-destructive surface finish measurement*“. Ova literatura kao izvor informacija pokazala se kao najkorisnija obzirom da je u konačnici pružila podatke koji su bili presudni u odabiru replike za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada.

Tema spomenutog znanstvenog rada predstavlja ispitivanje preciznosti i točnosti materijala za otiske prilikom repliciranja te mjerenja hrapavosti površina. Korištena su tri različita tipa replike i dvije različite metode mjerenja površinske hrapavosti. Replike su *RepliSet*, *Technovit* i *Press-O-Film*, a uređaji za provođenje mjerenja mjerni uređaj s ticalom te 3D optički mikroskop *Alicona InfiniteFocus*. [8]

Pokusni dio ovog rada provodio se na četiri površine obrađene standardnim postupcima strojne obrade. Površine uzoraka kreću se od glatke prema gruboj, a raspon vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* seže od 0,2  $\mu\text{m}$  do 1,6  $\mu\text{m}$ . Izbor triju replika za primjenu na uzorcima sveo se na izbor meke i fleksibilne, tvrde, te meke i tanke osjetljive na pritisak. Replika *RepliSet* predstavlja dvokomponentnu silikonsku gumu koja je meka i fleksibilna, *Technovit* replika epoksi smolu velike tvrdoće, a *Press-O-Film* replika je tanak, mekan film osjetljiv na pritisak. Primjena svake replike se razlikuje te su postupci opisani u nastavku. [8]

*RepliSet* se sastoji od polimera i komponente za otvrdnjavanje. Smjesa replike je u tekućem, „kremastom“ stanju i nalazi se u patronama koje se montiraju na pištolj za nanošenje. Replika se direktno nanosi na uzorak te lagano pritišće objektom ravne površine kako bi se osiguralo da stražnja strana replike bude ravna površina. Otvrdnjavanje smjese *RepliSet* otiska zahtjeva vremenski period od 5 minuta. [8]

*Technovit* replika silikonska je smjesa tekućine i praha u omjerima 3:1. Primjena se provodi nanošenjem tankog sloja na površinu uzorka omeđenu improviziranim kalupom kako ne bi došlo do izlivanja smjese. Proces otvrdnjavanja ove replike zahtjeva vremenski period od 5 minuta nakon čega je pažljivo uklonjena s uzorka. [8]

*Press-O-Film* otisak omogućuje najjednostavniju primjenu od svih spomenutih replika. Komponente ove replike su nestlačivi poliester obložen stlačivom mikropjenom. Sastav omogućuje da se prilikom primjene, replika položi na uzorak te pritisne jednolikom silom pri čemu se hrapavost površine replicira na mikropjenu. Glavni faktor kod primjene ove replike je

sila koja se primjenjuje. U slučaju primjene nedovoljne odnosno prevelike slike prilikom repliciranja, javlja se mogućnost nedovoljne replikacije odnosno oštećenja replike. [8]

Za meke replike poput silikonskih smjesa i filmova osjetljivih na pritisak, koriste se optičke nedestruktivne metode mjerenja. U ovom radu za spomenutu metodu koristio se već navedeni 3D optički mikroskop *Alicona InfiniteFocus*. Vertikalna rezolucija iznosila je 20 nm, lateralna 2  $\mu\text{m}$ , te *cut-off* vrijednost 0,8 mm. Kod tvrdih replika, kao što je *Technovit*, koriste se kontaktne metode mjerenja hrapavosti. U ovom slučaju, uređaj za mjerenje bio je 2D uređaj s ticalom *Taylor Hobson*. Duljina vrednovanja iznosila je 4 mm, uz *cut-off* vrijednost 0,8 mm te se koristilo ticalo s dijamantnim vrhom radijusa 2  $\mu\text{m}$ . [8]

Rezultati mjerenja pokazali su različite karakteristike svake pojedine replike. Generalno, sve tri replike daju kvalitetan otisak površine na razini parametra hrapavosti *Ra* u iznosu od 0,2  $\mu\text{m}$ . Na *Technovit* replici uočen je mali broj pora koje su uzrokovale pojavu odskakanja ponekih vrhova profila hrapavosti. *Press-O-Film* replika dala je zadovoljavajuće rezultate repliciranja površine. Međutim, postoji opasnost od lako mogućeg deformiranja replike prilikom prijenosa na mjerni uređaj ili samog postupka replikacije. Razlog tome je mala debljina ove replike. Spomenute replike postižu različite točnosti, no sve tri pokazuju visoku kvalitetu prilikom repliciranja površinske hrapavosti u rasponu od 0,2  $\mu\text{m}$  do 1,6  $\mu\text{m}$  parametra *Ra*. [8]

Po završetku ovog poglavlja, može se reći kako je pregled razne literature, a pogotovo izdvojenih znanstvenih radova, rezultirao vrlo korisnim informacijama. Posebice posljednje navedeni znanstveni rad za čije su potrebe korištene beskontaktne i kontaktne metode mjerenja. Na temelju svih dobivenih podataka i informacija, odlučeno je kako će se u eksperimentalnom dijelu diplomskog rada koristiti kontaktna metoda mjerenja hrapavosti površine, točnije korištenjem 2D uređaja s ticalom. Sukladno tome, potrebno je odabrati pogodan materijal replike za spomenutu metodu, što je pobliže objašnjeno u sljedećem poglavlju.

---

## 5. PREGLED REPLIKA

U ovom poglavlju opisani su postupci primjene otisaka u području mjerenja hrapavosti, najčešće spomenuti i korišteni materijali replika kao i sami proizvodi, te kratak opis izabrane replike za eksperimentalni dio ovog rada.

Postupak primjene otisaka koristi se kao nedestruktivna metoda indirektnog mjerenja površinske hrapavosti ukoliko se radi o površinama koje su nedostupne za direktno mjerenje prikladnim uređajima. Princip rada temelji se na direktnom nanošenju replike na površinu čija se hrapavost želi izmjeriti koristeći propisanu opremu. Pritom, točnost repliciranja površine tom vrstom otiska mora minimalno biti zadovoljavajuća, a po mogućnosti što kvalitetnija. Izbor replike često je ovisan o raznim faktorima, a ponajviše o metodi mjerenja koja se izvodi, tipu mjerene površine, te praćenim parametrima.

U prethodnom poglavlju prikazano je kako postoje razne vrste replika za različite metode mjerenja. Često je podjela replika bila svrstana u dvije skupine, meke i tvrde replike, odnosno za beskontaktno i kontaktno mjerenje. Kroz pregled literature jasno je da su se za replike vrlo često koristile dvokomponentne silikonske gume. Naime, razlog tome je izvrsna dimenzijska postojanost prilikom stezanja te kratak vremenski period otvrdnjavanja uz jednostavnu primjenu. Samo neke od spomenutih bile su *RepliSet F5* i *Dow Corning*. Uz silikonske gume, spomenuti su i filmovi osjetljivi na pritisak, preciznije *Press-O-Film*, no korištenje takvih replika pokazalo se nepovoljnim zbog velike mogućnosti deformiranja same replike.

Naposljetku, spomenuta je i replika koja je odabrana za eksperimentalni dio ovog rada. Riječ je o replici *Technovit*, dvokomponentnom polimeru na bazi silikona koja pripada skupini tvrdih replika. Upravo je zato izbor sveden na spomenutu repliku, obzirom da je vrlo pogodna za kontaktno mjerenje bez mogućnosti lakog oštećenja površine replike.

### 5.1. Replika Technovit 3040

*Technovit* replike proizvodi tvrtka *Kulzer Technik*, Njemačka. Sa svojim radom tvrtka započinje davne 1936. godine kada je Gottfried Roth otkrio da je polimetilmetakrilat (PMMA) pogodan za korištenje kao smjesa za oblikovanje. Razvitkom kompanije, postaju jedni od glavnih proizvođača raznih materijala i proizvoda u raznovrsnim poljima kao što su metalografija, histologija, veterinarska medicina i slično. [9] Tvrtka *Kulzer Technik* ujedno je i dobavljač replike korištene za eksperimentalni dio rada, *Technovit 3040*.

*Technovit 3040* [Slika 10] dvokomponentna je smola na bazi metil-metakrilata koja se dobije miješanjem praškaste i tekuće komponente. Ovom replikom moguće je uzeti otiske za indirektno mjerenje parametara površine, uzeti i arhivirati otisak trenutnog stanja površine, izraditi negativne kalupa i rekreirati pozitivne kalupa koristeći postupak duplog kalupljenja. [10]



Slika 10. Replika *Technovit 3040* [10]

Korištenje replike *Technovit 3040* prikladno je u situacijama kada je uzorak prevelik ili pretežak za ispitivanje u laboratoriju, u slučaju nedestruktivnog ispitivanja, kada se radi o područjima nedostupnim za direktno mjerenje, u slučaju ispitivanja trošenja i dr. [10]

Ovisno o zahtjevanoj konzistenciji konačne mase, omjeri miješanja praškaste i tekuće komponente kreću se od 1:1 sve do 3:1 (prah/tekućina). Praškastu komponentnu predstavlja prah smole za hladno otvrdnjavanje, a tekuću *Technovit* univerzalna tekućina [Slika 11].



Slika 11. *Technovit* prah (lijevo) i *Technovit* univerzalna tekućina (desno)

Nakon miješanja praha i univerzalne tekućine, dobivena smjesa prikladna je za izlivanje idućih 2 minute, a mjesiva još 30 sekundi. Vremenski period otvrdnjavanja iznosi 5 minuta što omogućuje dovoljno vremena za primjenu smjese na uzorak. [10]

Prednosti tehničkih svojstava ove replike su točnost replikacije do 1  $\mu\text{m}$ , dimenzijska postojanost, jednostavno i lako uklanjanje s uzorka bez oštećenja i ugrožavanja površine otiska, mogućnost miješanja pri različitim omjerima, te mogućnost korištenja replike na kontaktnim i beskontaktnim uređajima za mjerenje površinske hrapavosti. [10]

Upravo zbog prethodno spomenutih prednosti, te sama činjenica da se radi o tvrdom materijalu otiska koji je pogodan za 2D uređaje s ticalom, *Technovit 3040* izabran je kao replika koja će se koristiti u eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada.

---

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela diplomskog rada je prikazati prikladnost materijala *Technovit 3040* prilikom izuzimanja otisaka različito obrađenih površina s različitim stanjima hrapavosti. Odabrano je po pet ispitnih površina iz tri skupine klasičnih strojnih obrada. Promatrani parametri hrapavosti su parametri  $R_a$  i  $R_z$ . Provedeno je mjerenje na pet tragova distribuiranih preko ispitnih površina svakog uzorka, a potom identičan postupak ponovljen na površinama replika. Zatim su dobiveni rezultati uspoređeni i analizirani, na temelju čega je donešen i zaključak.

Postupak izvođenja mjerenja provodio se u nekoliko koraka. Prvi je korak bila priprema površina za mjerenje u smislu čišćenja, kako ne bi došlo do pojave nepravilnosti prilikom mjerenja uzrokovane nečistoćama. Drugi korak je pozicioniranje ispitnih površina na uređaj te pozicioniranje ticala uređaja na spomenutu površinu. Zatim, u trećem koraku prilagođavaju se parametri mjerenja: *cut-off* vrijednost, duljna vrednovanja i vertikalni raspon. Četvrti korak predstavlja probno mjerenje kako bi se osiguralo da će se sljedeća mjerenja provesti u skladu s normom ISO 4288:1996. Za probno mjerenje postavlja se *cut-off* vrijednost  $\lambda_c = 0,8$  mm, te se dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  provjeravaju nalaze li se unutar dozvoljenih granica za postavljenu *cut-off*. Ukoliko je probno mjerenje u skladu s normom, nastavlja se s daljnjim provođenjem mjerenja gdje se iduće dobivene vrijednosti bilježe pod rezultate mjerenja.



## 6.1. Provođenje mjerenja na uzorcima

Za uzorke odabrano je pet mjernih površina (N2, N4, N6, N8 i N10) iz tri različite skupine klasičnih strojnih obrada (skupine A, B i C). Svaka površina obrađena je određenim postupkom obrade što omogućuje različite profile površina s različitim stanjima hrapavosti. Slika 12. prikazuje pločicu s odabranim uzorcima.



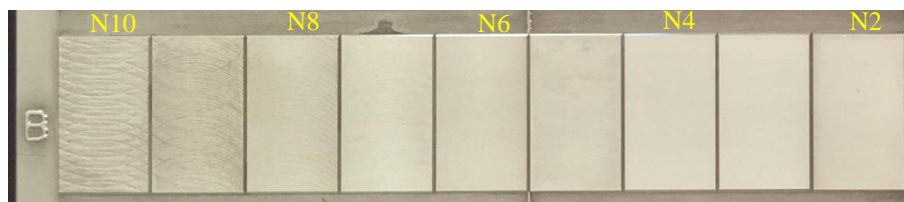
Slika 12. Pločica s uzorcima

Skupina A [Slika 13] predstavlja površine obrađene postupcima obodnog glodanja i brušenja. Unutar te skupine izdvojene su površine N2, N4 i N6 obrađene postupcima brušenja, te N8 i N10 obrađene postupkom obodnog glodanja.



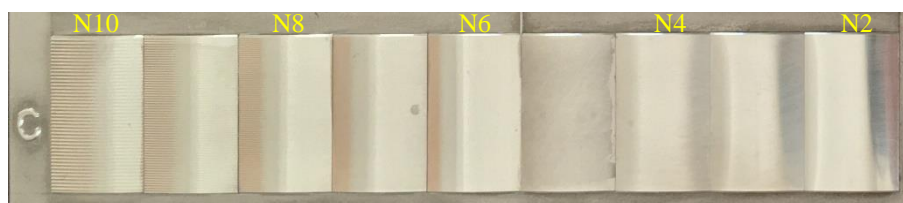
Slika 13. Uzorci skupine A

Skupina B [Slika 14] predstavlja površine obrađene postupcima lepanja i čeonog glodanja. Unutar te skupine izdvojene su površine N2 i N4 obrađene postupkom lepanja, te N6, N8 i N10 obrađene postupkom čeonog glodanja.



**Slika 14. Uzorci skupine B**

Skupina C [Slika 15] predstavlja površine obrađene postupcima blanjanja/tokarenja i honanja sa superfinišem. Unutar te skupine izdvojene su površine N2 i N4 obrađene postupkom honanja sa superfiniš završnom obradom, te N6, N8 i N10 obrađene postupkom blanjanja/tokarenja.



**Slika 15. Uzorci skupine C**

U skladu s normom ISO 4288:1996: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*, koja definira *cut-off* i duljinu vrednovanja, provedeno je mjerenje parametara  $Ra$  i  $Rz$  svakog uzorka na pet tragova distribuiranih preko ispitnih površina. Sveukupno je provedeno po 25 mjerenja svake skupine obrade. Parametri  $Ra$  i  $Rz$  definirani su normom ISO 4287: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. Uređaj kojim su se provodila mjerenja je *Perthometer S8P*, čije su tehničke karakteristike ticala: radijus  $r = 5 \mu\text{m}$  i mjerna sila  $F = 1,5 \text{ mN}$ . Karakteristike korištenog mjernog uređaja definirane su normom ISO 3274: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*.

**Tablica 2. Referente vrijednosti norme ISO 4288:1996 [11]**

REFERENTNA DULJINA ( <i>Cut-off</i> )	DULJINA VREDNOVANJA	PERIODIČKI PROFIL	APERIODIČKI PROFIL	
$\lambda_c$ , [mm]	$ln = 5 \times lr$ , [mm]	$RSm$ , [mm]	$Rz$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$Ra$ , [ $\mu\text{m}$ ]
0,08	0,4	> 0,013 do 0,04	< 0,1	< 0,02
0,25	1,25	> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1
0,8	4	> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2
2,5	12,5	> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10
8,0	40	> 1,3 do 4	> 50	> 10

### 6.1.1. Skupina A

Kao što je već spomenuto u potpoglavlju 6.1., skupina A predstavlja površine obrađene postupcima obodnog glodanja i brušenja. Izdvojene su površine N2, N4, N6, N8 i N10. Prije zabilježavanja rezultata, na svakom uzorku provedeno je probno mjerenje u svrhu provjere sukladnosti s normom ISO 4288:1996.

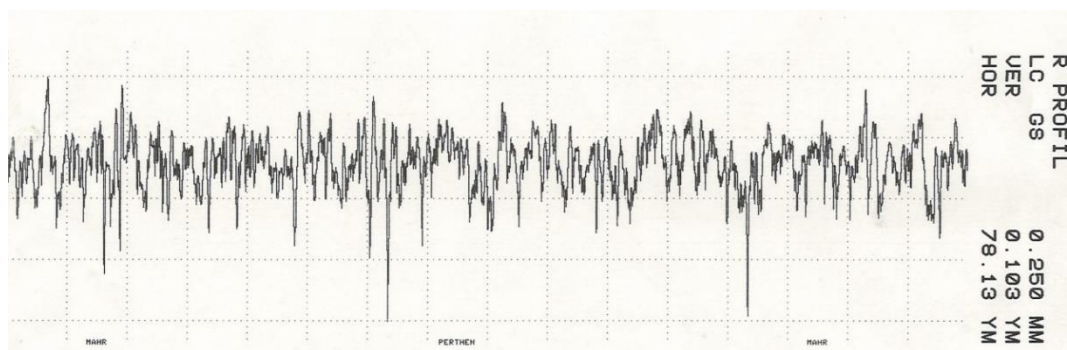
Površina uzorka N2-A obrađena je postupkom brušenja. Tablica 3. prikazuje parametre mjerenja. Slika 16. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine, dok Tablica 4. prikazuje dobivene rezultate promatranih parametara  $Ra$  i  $Rz$ .

**Tablica 3. Parametri mjerenja uzorka N2-A**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 4. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za uzorak N2-A**

N2-A		
	$Ra$ [nm]	$Rz$ [nm]
<b>1. trag</b>	33	343
<b>2. trag</b>	34	299
<b>3. trag</b>	34	288
<b>4. trag</b>	34	311
<b>5. trag</b>	34	277



**Slika 16. Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-A**

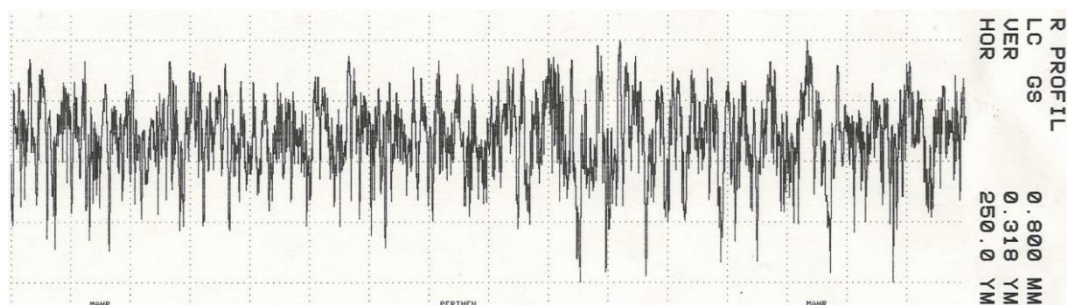
Površina uzorka N4-A obrađena je postupkom brušenja. Tablica 5. prikazuje parametre mjerenja. Slika 17. daje prikaz dijagrama profila hrapavosti površine, dok Tablica 6. prikazuje dobivene rezultate promatranih parametara  $Ra$  i  $Rz$ .

**Tablica 5. Parametri mjerenja uzorka N4-A**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 6. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za uzorak N4-A**

N4-A		
	$Ra$ [nm]	$Rz$ [nm]
<b>1. trag</b>	158	1139
<b>2. trag</b>	154	1180
<b>3. trag</b>	169	1108
<b>4. trag</b>	165	1167
<b>5. trag</b>	165	1236



**Slika 17. Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-A**

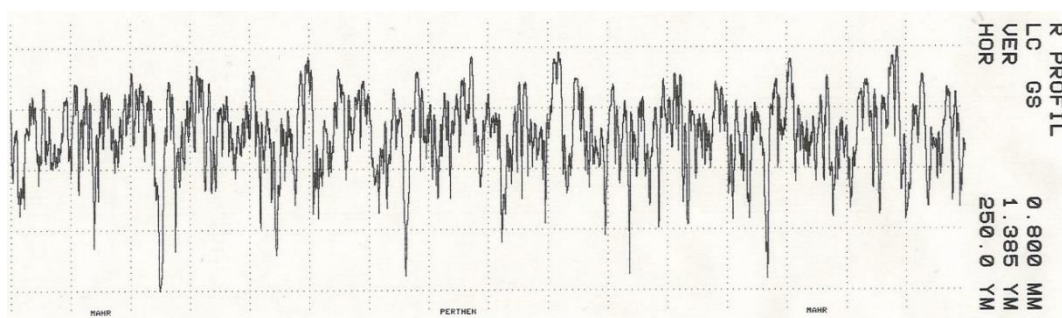
Površina uzorka N6-A obrađena je postupkom brušenja. Tablica 7. prikazuje parametre mjerenja. Slika 18. daje prikaz dijagrama profila hrapavosti površine, dok Tablica 8. prikazuje dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$ .

**Tablica 7. Parametri mjerenja uzorka N6-A**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 8. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N6-A**

N6-A		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	658	4673
<b>2. trag</b>	650	4456
<b>3. trag</b>	680	4726
<b>4. trag</b>	751	4604
<b>5. trag</b>	675	4533



**Slika 18. Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-A**

Površina uzorka N8-A obrađena je postupkom obodnog glodanja. Tablica 9. prikazuje parametre mjerenja, dok Tablica 10. dobivene rezultate promatranih parametara  $Ra$  i  $Rz$ .

**Tablica 9. Parametri mjerenja uzorka N8-A**

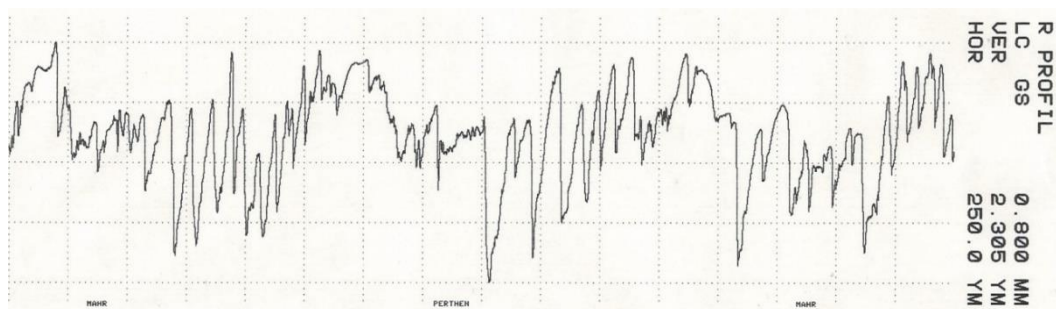
Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 10. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za uzorak N8-A**

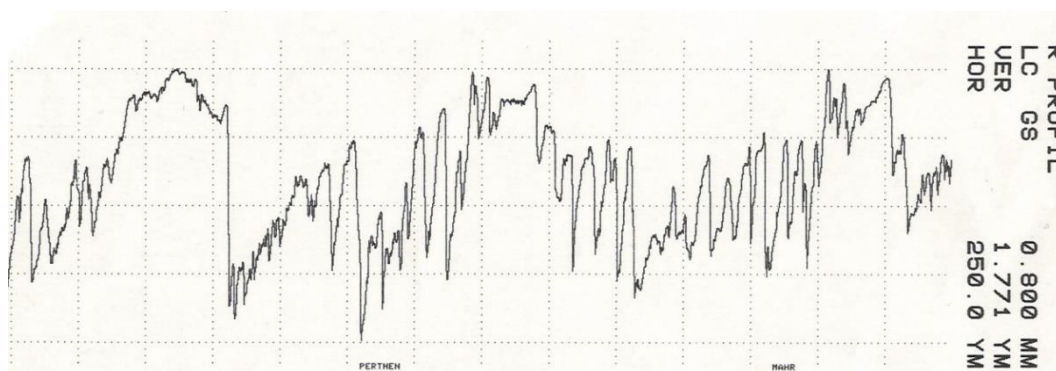
N8-A		
	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	1,347	7,866
<b>2. trag</b>	1,431	7,821
<b>3. trag</b>	1,319	8,061
<b>4. trag</b>	1,092	6,256
<b>5. trag</b>	1,313	6,003



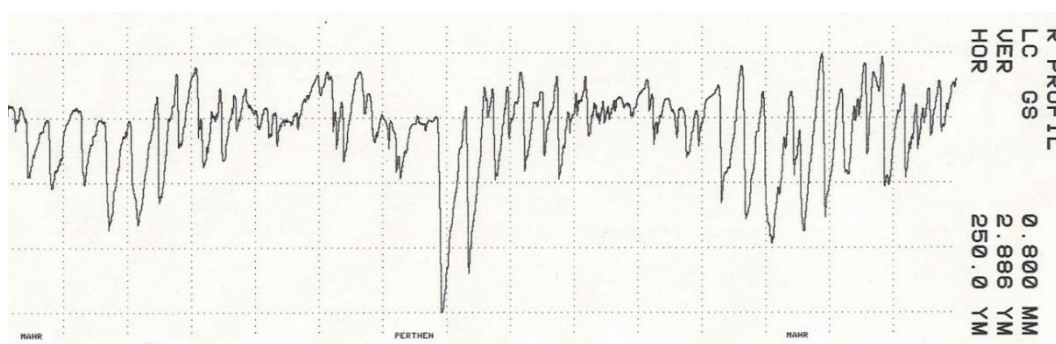
Prilikom mjerenja hrapavosti površine uzorka N8-A, uočeni su različiti profili hrapavosti, ovisni samo o poziciji uzetog traga. Naime za istu površinu, dijagrami profila dali su potpuno drugačije oblike. Kako bi se ova karakteristika pobliže prikazala, izdvojena su tri grafička prikaza profila hrapavosti iste površine. Slika 19., Slika 20. i Slika 21. prikazuju dijagrame profila prvog, trećeg i petog traga mjerenja.



**Slika 19. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (1. trag)**



**Slika 20. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (3. trag)**



**Slika 21. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-A (5. trag)**



Površina uzorka N10-A obrađena je postupkom obodnog glodanja. Tablica 11. prikazuje parametre mjerenja. Slika 22. daje grafički prikaz profila hrapavosti, dok dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 12.

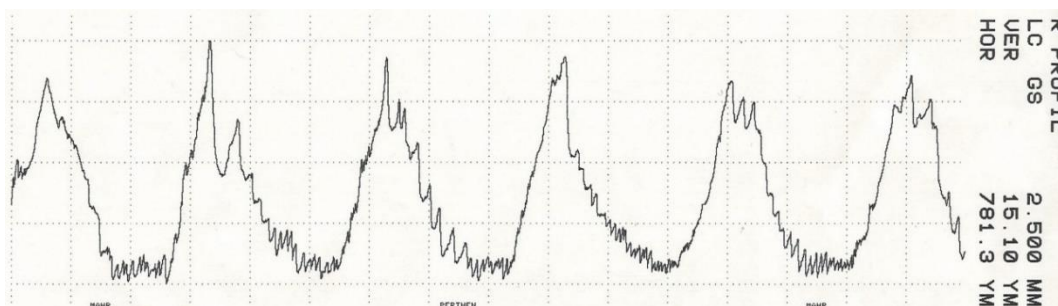
**Tablica 11. Parametri mjerenja uzorka N10-A**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

Zbog ograničenja veličine mjernih površina, na uzorku N10-A nije bilo moguće provesti mjerenja hrapavosti sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996. Rezultati mjerenja su zabilježeni s napomenom da se radi o mjerenju koje nije provedeno sukladno normi ISO 4288:1996. Također, kako bi grafički prikaz profila bio uspješan, odabran je vertikalni raspon od 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 12. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N10-A**

N10-A ( $\lambda_c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	13,29	52,76
<b>2. trag</b>	14,77	55,10
<b>3. trag</b>	15,03	55,18
<b>4. trag</b>	15,58	57,37
<b>5. trag</b>	13,46	52,76



**Slika 22. Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-A**

### 6.1.2. Skupina B

Uzorci skupine B predstavljaju površine obrađene postupcima lepanja i čeonog glodanja. Kao i kod skupine A, izdvojene su površine N2, N4, N6, N8 i N10, te je prije zabilježavanja rezultata također provedeno probno mjerenje u svrhu provjere sukladnosti s normom ISO 4288:1996.

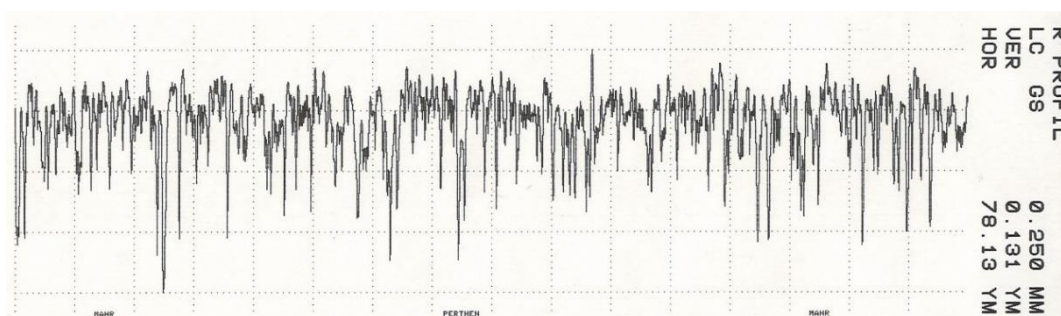
Površina uzorka N2-B obrađena je postupkom lepanja. Tablica 13. prikazuje parametre mjerenja, a grafički prikaz profila hrapavosti predstavlja Slika 23. Dobivene rezultate promatrani parametara  $R_a$  i  $R_z$  daje Tablica 14.

**Tablica 13. Parametri mjerenja uzorka N2-B**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 14. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N2-B**

N2-B		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	52	406
<b>2. trag</b>	51	426
<b>3. trag</b>	52	452
<b>4. trag</b>	53	474
<b>5. trag</b>	49	461



**Slika 23. Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-B**

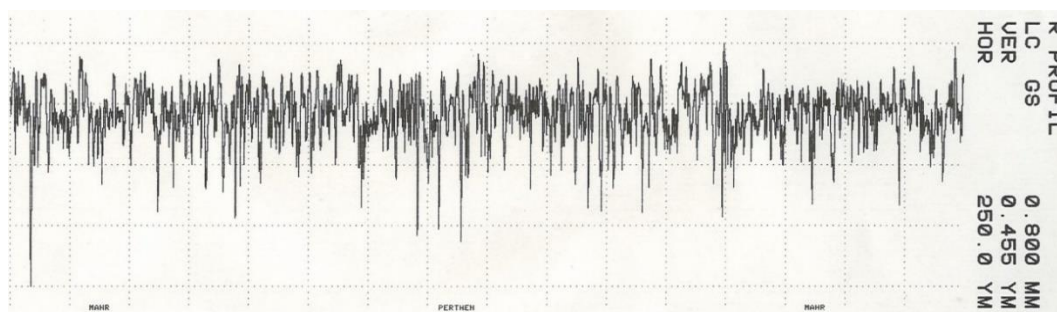
Površina uzorka N4-B također je obrađena postupkom lepanja. Tablica 15. prikazuje parametre mjerenja, a grafički prikaz profila hrapavosti predstavlja Slika 24. Dobivene rezultate promatrani parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 16.

**Tablica 15. Parametri mjerenja uzorka N4-B**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 16. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N4-B**

N4-B		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	163	1563
<b>2. trag</b>	148	1358
<b>3. trag</b>	153	1439
<b>4. trag</b>	150	1205
<b>5. trag</b>	155	1254



**Slika 24. Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-B**

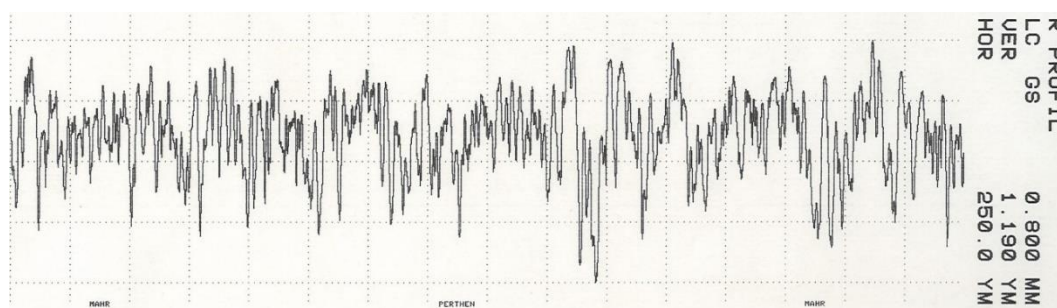
Površina uzorka N6-B obrađena je postupkom čeonog glodanja. Tablica 17. prikazuje parametre mjerenja, a grafički prikaz profila hrapavosti predstavlja Slika 25. Dobivene rezultate promatrani parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 18.

**Tablica 17. Parametri mjerenja uzorka N6-B**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 18. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N6-B**

N6-B		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	875	5117
<b>2. trag</b>	864	5338
<b>3. trag</b>	751	4387
<b>4. trag</b>	711	4336
<b>5. trag</b>	620	4018



**Slika 25. Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-B**

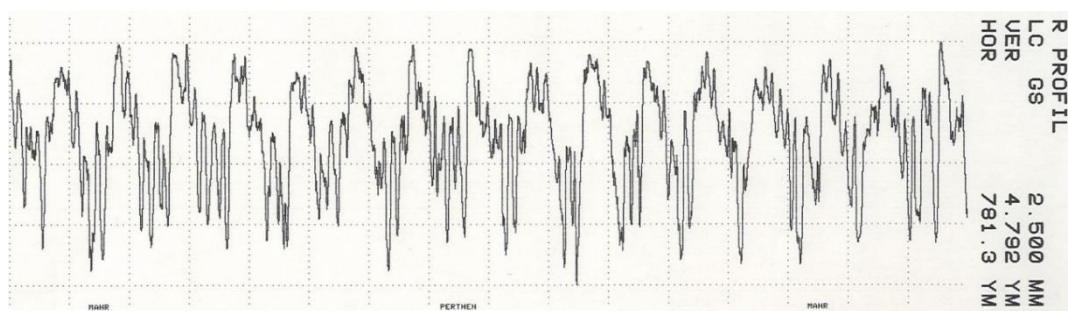
Površina uzorka N8-B obrađena je postupkom čeonog glodanja. Tablica 19. prikazuje parametre mjerenja, a grafički prikaz profila hrapavosti predstavlja Slika 26. Dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 20.

**Tablica 19. Parametri mjerenja uzorka N8-B**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 20. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N8-B**

N8-B		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	2,834	15,42
<b>2. trag</b>	2,818	15,41
<b>3. trag</b>	2,861	16,75
<b>4. trag</b>	3,318	17,76
<b>5. trag</b>	3,339	16,90



**Slika 26. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-B**

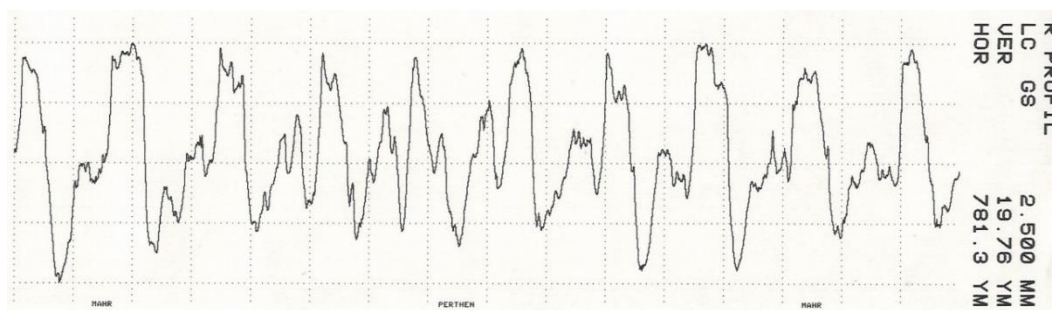
Površina uzorka N10-B obrađena je postupkom čeonog glodanja. Parametri prilikom mjerenja prikazuje Tablica 21., a grafički prikaz profila hrapavosti predstavlja Slika 27. Dobiveni rezultati promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 22. Poput situacije s uzorkom N10-A, zbog ograničene veličine površine na uzorku N10-B nije bilo moguće provesti mjerenja, odnosno izbor *cut-off* vrijednosti prema zahtjevima norme ISO 4288:1996. Radi kvalitetnijeg grafičkog prikaza profila, odabrani vertikalni raspon iznosio je 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 21. Parametri mjerenja uzorka N10-B**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

**Tablica 22. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N10-B**

N10-B ( $\lambda_c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	11,16	57,64
<b>2. trag</b>	15,61	68,81
<b>3. trag</b>	13,20	61,45
<b>4. trag</b>	16,24	75,57
<b>5. trag</b>	14,30	61,15



**Slika 27. Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-B**

### 6.1.3. Skupina C

Površine skupine C pripadaju postupcima obrade honanja sa superfinišem te blanjanja/tokarenja. Kao i kod skupina A i B, izdvojene su površine N2, N4, N6, N8 i N10. Prije svakog mjerenja provedeno je probno mjerenje u svrhu provjere sukladnosti rezultata s normom ISO 4288:1996.

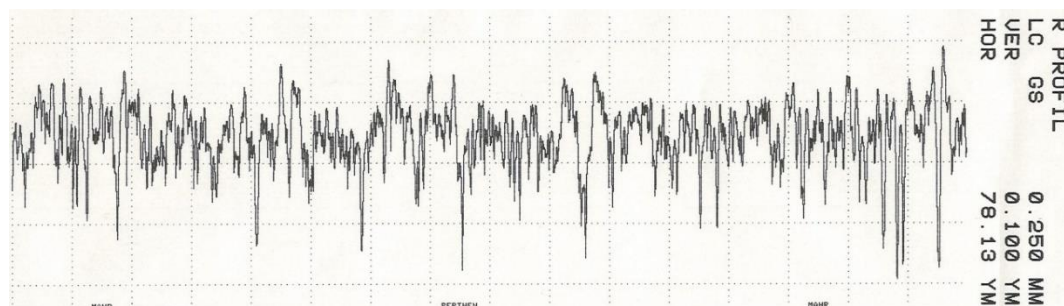
Površina uzorka N2-C obrađena je postupkom honanja sa superfiniš završnom obradom. Tablica 23. prikazuje parametre prilikom mjerenja, a Tablica 24. daje dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$ . Slika 28. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine ovog uzorka.

**Tablica 23. Parametri mjerenja uzorka N2-C**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 24. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N2-C**

N2-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	45	356
<b>2. trag</b>	39	321
<b>3. trag</b>	40	283
<b>4. trag</b>	45	296
<b>5. trag</b>	46	136



**Slika 28. Dijagram profila hrapavosti uzorka N2-C**



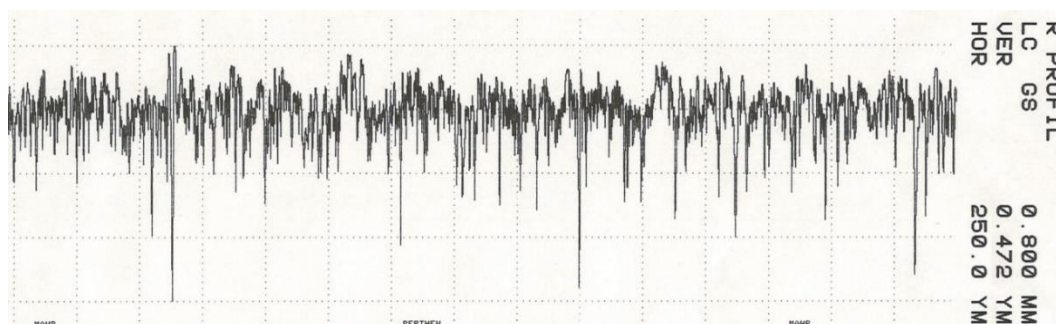
Površina uzorka N4-C obrađena je postupkom kao i N2-C, honanje sa superfinašom. Tablica 25. prikazuje parametre prilikom mjerenja, a Tablica 26. daje dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$ . Slika 29. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine ovog uzorka.

**Tablica 25. Parametri mjerenja uzorka N4-C**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 26. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N4-C**

N4-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	154	1653
<b>2. trag</b>	142	1580
<b>3. trag</b>	143	1527
<b>4. trag</b>	140	1472
<b>5. trag</b>	140	1529



**Slika 29. Dijagram profila hrapavosti uzorka N4-C**



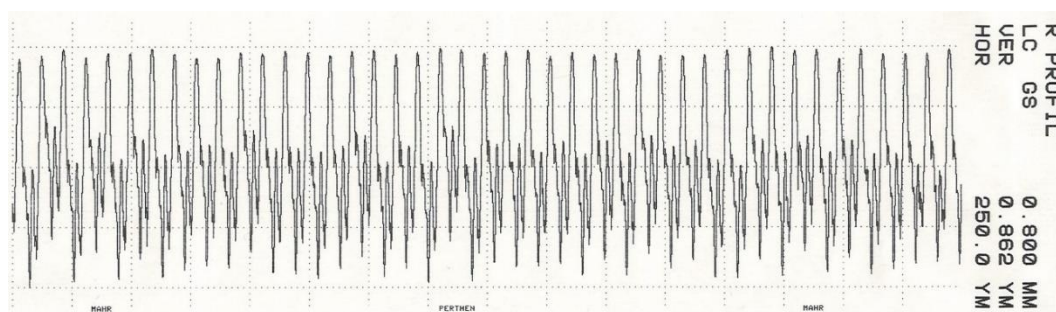
Površina uzorka N6-C obrađena je postupkom blanjanja/tokarenja. Tablica 27. prikazuje parametre prilikom mjerenja, a Tablica 28. daje dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$ . Slika 30. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine ovog uzorka.

**Tablica 27. Parametri mjerenja uzorka N6-C**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 28. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N6-C**

N6-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	691	3464
<b>2. trag</b>	677	3387
<b>3. trag</b>	673	3325
<b>4. trag</b>	666	3352
<b>5. trag</b>	661	3310



**Slika 30. Dijagram profila hrapavosti uzorka N6-C**

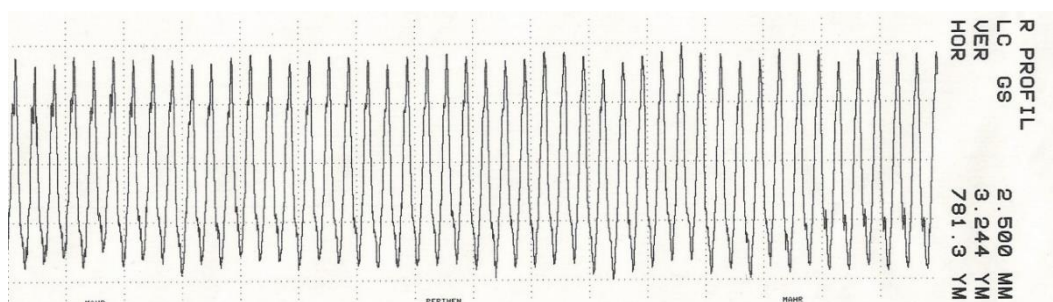
Površina uzorka N8-C obrađena je postupkom blanjanja/tokarenja. Tablica 29. prikazuje parametre prilikom mjerenja, a Tablica 30. daje dobivene rezultate promatranih parametara  $Ra$  i  $Rz$ . Slika 31. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine ovog uzorka.

**Tablica 29. Parametri mjerenja uzorka N8-C**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 30. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za uzorak N8-C**

N8-C		
	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	3,251	12,32
<b>2. trag</b>	3,358	12,41
<b>3. trag</b>	3,371	12,67
<b>4. trag</b>	3,271	12,26
<b>5. trag</b>	3,268	12,24



**Slika 31. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8-C**

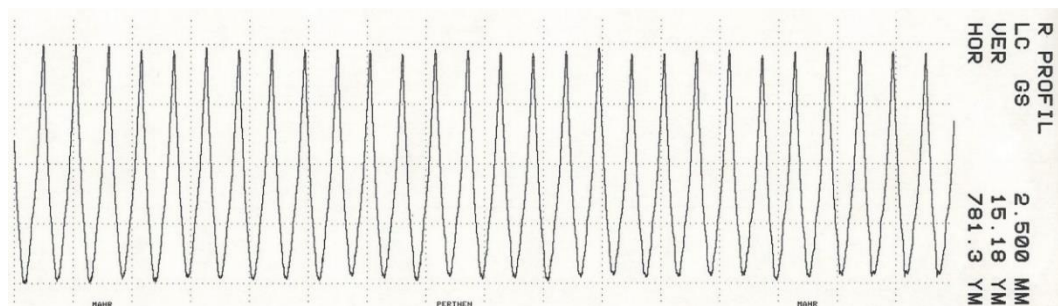
Površina uzorka N10-C obrađena je postupkom kao površine N6-C i N8-C, blanjanje/tokarenje. Tablica 31. prikazuje parametre prilikom mjerenja, a Tablica 32. daje dobivene rezultate promatranih parametara  $R_a$  i  $R_z$ . Slika 32. prikazuje dijagram profila hrapavosti površine ovog uzorka. Poput uzoraka N10 prethodnih skupina, mjerenja provedena na uzorku N10-C također nisu sukladna zahtjevima norme ISO 4288:1996. Radi kvalitetnijeg grafičkog prikaza profila, odabran je vertikalni raspon od 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 31. Parametri mjerenja uzorka N10-C**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

**Tablica 32. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorak N10-C**

N10-C ( $\lambda_c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	14,67	59,28
<b>2. trag</b>	14,82	59,02
<b>3. trag</b>	14,38	58,06
<b>4. trag</b>	14,34	57,83
<b>5. trag</b>	14,44	58,44

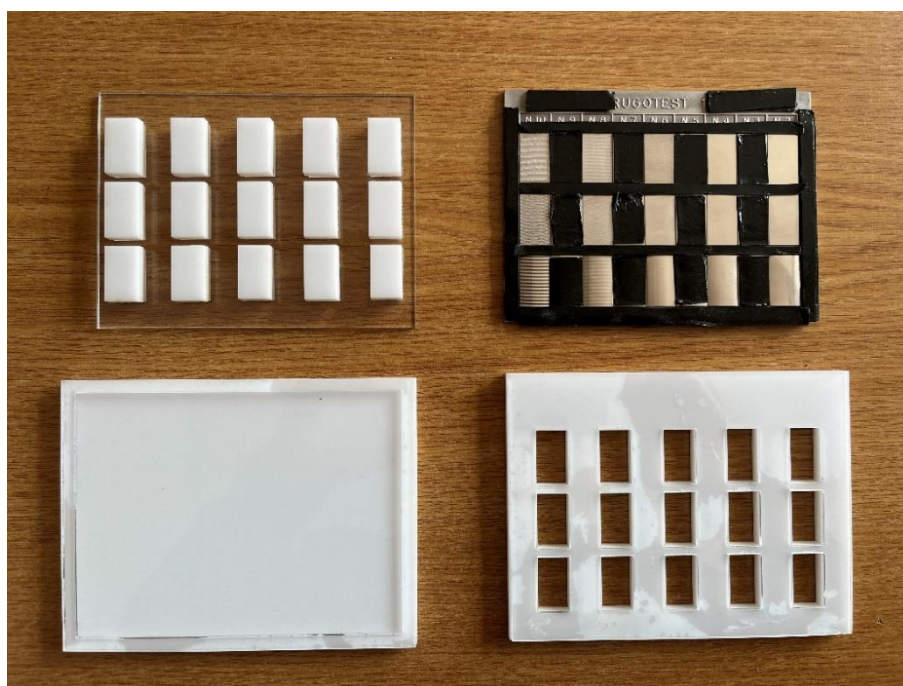


**Slika 32. Dijagram profila hrapavosti uzorka N10-C**

## 6.2. Izrada kalupa za izlijevanje

Najčešća primjena replika je direktno nanošenje na površinu čija se hrapavost mjeri. Nanošenje smjese replike, koja je u većini slučajeva tekućeg stanja, izvodi se adekvatnim pištoljem za nanošenje ili direktnim izlijevanjem. *Technovit 3040* dolazi u obliku praha koji se miješa s univerzalnom tekućinom dobivajući tako masu za otisak u tekućem stanju, čije se nanošenje izvodi direktnim izlijevanjem. Upravo zato, potrebno je izraditi kalup kako se ne bi onečistila okolina ili došlo do prelijevanja. Također, zadržavanje pravilnog oblika prilikom otvrdnjavanja mase još je jedna funkcija kalupa.

Za eksperimentalni dio ovog rada, izrađen je kalup prikazan na Slika 33. Dijelovi kalupa su: ležište (dolje lijevo), okvir za izlijevanje (dolje desno), poklopac (gore lijevo) i brtva (gore desno). Svi dijelovi kalupa, osim brtve, izrađeni su od prozirnog i bijelog pleksiglasa.



Slika 33. Dijelovi kalupa

Ležište [Slika 34] predstavlja donji dio kalupa. Njegova je funkcija pozicioniranje pločice s uzorcima i osiguravanje da se pločica ne pomakne prilikom izlivanja mase. Sastoji se od podložne ploče i tankog okvira naljepljenog na podložnu ploču. Okvir je izrađen od prozirnog pleksiglasa debljine 2 mm, a podložna ploča od bijelog pleksiglasa debljine 5 mm. Podložna ploča služi za osiguravanje ravne površine na kojoj će se nalaziti pločica s uzorcima, dok je tanki okvir izrađen od materijala debljine kao i sama pločica. Time se dobije ista visina okvira ležišta i pločice na koju potom ide brtva, što rezultira ravnomjernim nasjedanjem okvira za izlivanje.



**Slika 34. Ležište (donji dio kalupa)**

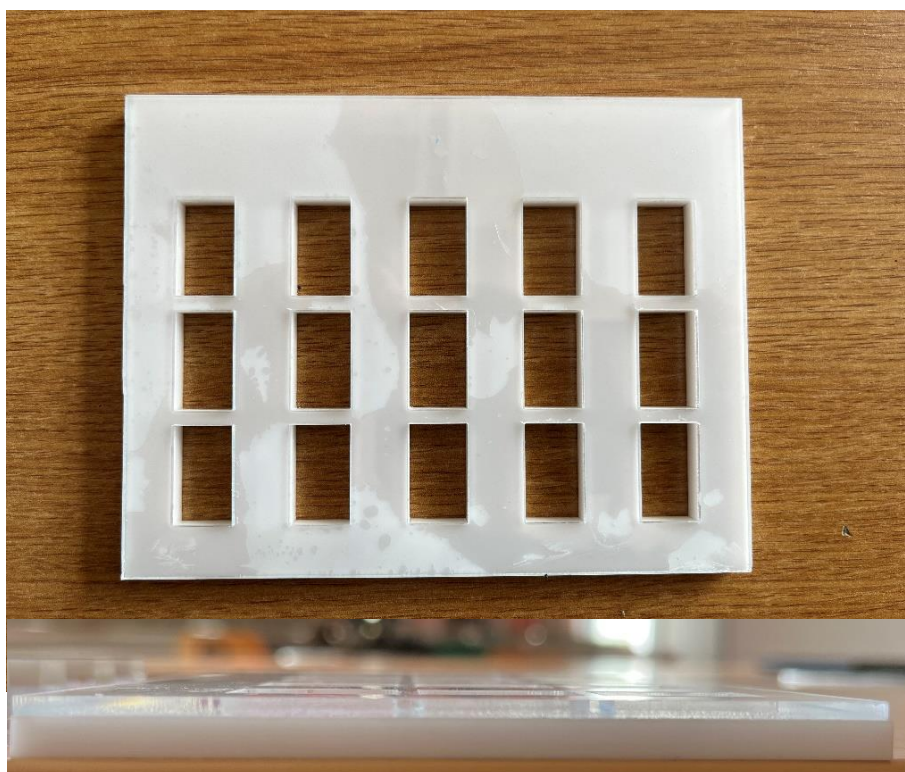


Brtvu [Slika 35] predstavlja univerzalna obostrano ljepljiva traka. Njezina je funkcija sprječavanje prelijevanja mase ispod okvira za izlijevanje. Brtvom su pokriveni dijelovi pločice nevažni za eksperimentalni dio, čime se postiže da izlivena masa replicira samo površine izdvojenih uzoraka. Nanosi se direktnim ručnim lijepljenjem na pločicu, a na brtvu se direktno postavlja okvir za izlijevanje.



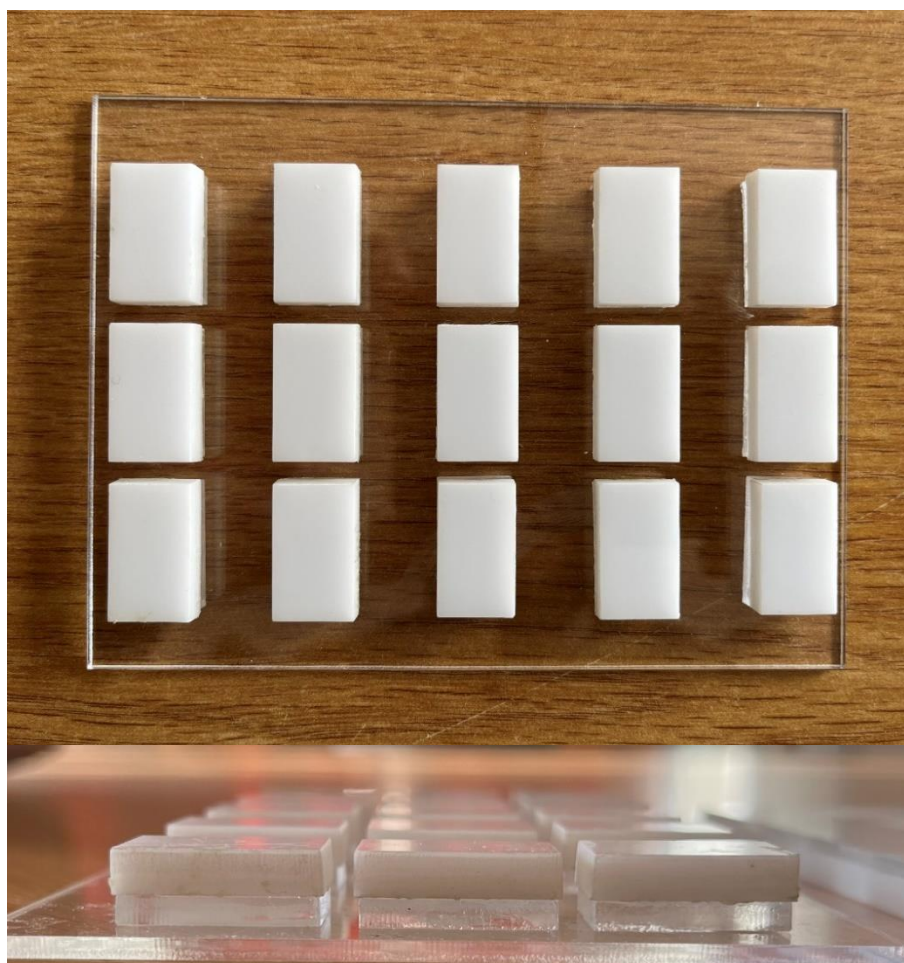
**Slika 35. Brtva postavljena na pločicu**

Okvir za izlivanje [Slika 36] izrađen je od bijelog i prozirnog pleksiglasa debljina 5 mm i 3 mm. Korištene su dvije vrste debljine zbog naputka proizvođača da replika mora biti minimalno 5 mm debljine. Donji dio okvira debljine 5 mm, služi za određivanje minimalne granice do koje se izlijeva masa. Gornji dio okvira debljine 3 mm služi kao oslonac za poklopac kalupa. Funkcija kompletnog okvira je odvajanje odabranih površina na čije se površine nanosi masa za otisak. Uz odvajanje, okvir služi za zadržavanje pravilnog oblika replike prilikom otvrdnjavanja smjese.



**Slika 36. Okvir za izlivanje**

Poklopac kalupa [Slika 37] izrađen je od iste vrste materijala kao i ostali dijelovi. Sastoji se od tri dijela: ploče, donje matrice te gornje matrice. Ploča i donja matrica izrađeni su od prozirnog pleksiglasa debljine 3 mm, dok je gornja matrica od bijelog pleksiglasa debljine 5 mm. Svaka matrica izrađena je od pravokutnih blokova istih dimenzija kao površine koje se repliciraju. Funkcija poklopca je zadržavanje minimalne debljine replike od 5 mm što se postiže duplom matricom. Također, poklopcem se omogućava da stražnja strana otisaka bude čim više ravna kako bi se olakšala kasnija provedba mjerenja korištenjem 2D uređaja s ticalom.



**Slika 37. Poklopac kalupa**



Montaža kompletnog kalupa sastoji se od nekoliko koraka. Prije svega potrebno je postaviti brtvu, odnosno obostranu ljepljivu traku na pločicu s uzorcima kako bi se izdvojili odabrani uzorci. Potom se pločica s uzorcima umeće u ležište. Idući korak je postavljanje i lijepljenje okvira za izlivanje na ležište i brtvu. U ovoj fazi, kalup je spreman za izlivanje mase otiska. Nakon postupka izlivanja, potrebno je montirati poklopac kalupa na način da se utori okvira i matrice blokova poklopca podudaraju, a zatim ostaviti kalup određeno vrijeme potrebno za otvrdnjavanje mase.

### 6.3. Priprema mase za otiske

Odabrani materijal za otiske je *Technovit 3040* tvrtke *Kulzer Technik*. Riječ je o dvokomponentnoj smoli na bazi metil-metakrilata koja se dobije miješanjem praškaste i tekuće komponente. Detaljniji opis *Technovit-a 3040* može se pronaći u poglavlju 5.1.



Slika 38. *Technovit 3040* prah i *Technovit* univerzalna tekućina

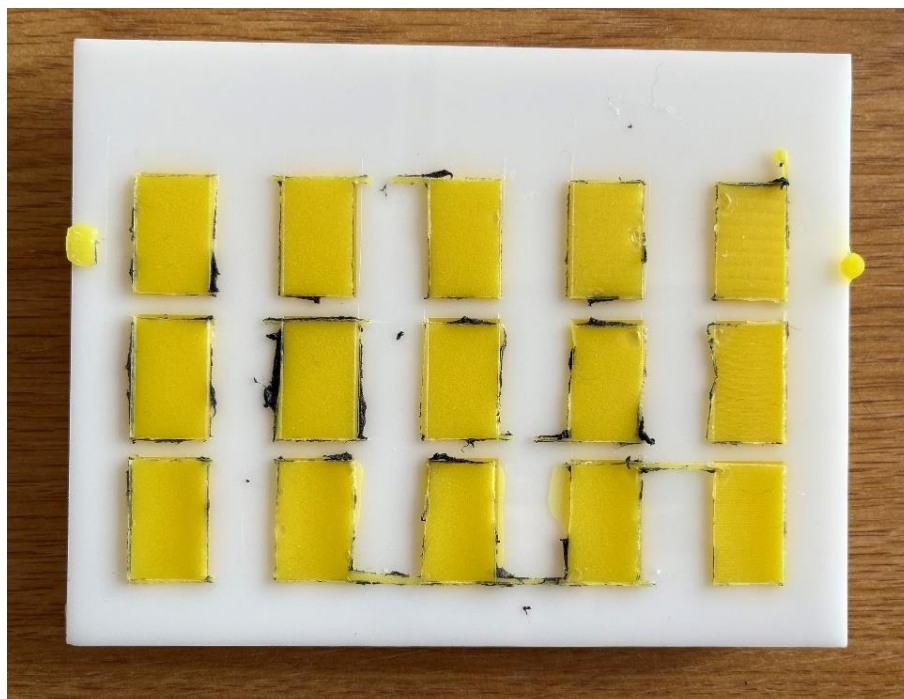
Priprema mase provedena je prema uputama proizvođača. Omjeri praškaste i tekuće komponente su 2:1, odnosno 4 mjerice praha i 2 mjerice tekućine. Za potrebe miješanja te izlivanja korištena je papirnata čašica i drvena špatula, što prikazuje Slika 39.



**Slika 39. Oprema za miješanje i izlivanje mase**

Postupak pripreme mase za otiske odvijao se u nekoliko koraka. Prvi korak je izlijevanje cjelokupne mjere univerzalne tekućine u čašicu te dodavanje polovice mjere praha, odnosno dvije mjerice tekućine i dvije mjerice praha. Zatim je potrebno temeljito promiješati kako bi se prah i tekućina kvalitetno i potpuno povezali. Idući korak je dodavanje druge polovice mjere praha, preostale dvije mjerice, prilikom kontinuiranog miješanja te nastaviti miješanje još 40 sekundi nakon dodavanja. Po završetku miješanja, ostaviti smjesu da se slegne idućih 10 do 15 sekundi. Nakon isteka navedenog vremena, masa je spremna za izlijevanje idućih 2 minute. Pripremljena masa izlijeva se u izrađeni kalup te je potrebno ostaviti masu 8 do 10 minuta kako bi se izvršio proces polimerizacije. Nakon 8 minuta, završio je proces polimerizacije i masa je otvrdnula paralelno replicirajući površinu uzoraka.

Prilikom polimerizacije, došlo je do povezivanja okvira, poklopca i same mase, te njihovog međusobnog sljepljivanja. Posljedica ovog nenamjernog postupka bila je nemogućnost odvajanja poklopca kalupa od okvira kako bi se otisci izvadili iz kalupa. Međutim, korištenje obostrano ljepljive trake pokazalo se korisnim kao funkcija brtve i tako što je u ovom slučaju omogućila odvajanje replika od pločice s uzorcima. Naposljetku, povezivanje okvira i poklopca kalupa s masom za otiske rezultiralo je dobivanjem pločice s replikama što prikazuje Slika 40.



**Slika 40. Pločica s replikama**

#### **6.4. Provođenje mjerenja otisaka**

Mjerenje hrapavosti površina otisaka provedeno je istim postupkom kao mjerenje hrapavosti površina uzoraka. Svaki otisak daje zrcaljenu površinu (negativ) određenog uzorka, te sukladno tome izdvojene površine replika su N2', N4', N6', N8' i N10' iz svake pojedine skupine strojne obrade, A, B i C. Kao kod površina uzoraka, provedeno je mjerenje parametara  $R_a$  i  $R_z$  na pet tragova distribuiranih preko ispitnih površina u skladu s normom ISO 4288:1996, izuzevši površine replika N10'-A, N10'-B i N10'-C. Slika 40. prikazuje pločicu s otiscima, odnosno replikama.

### 6.4.1. Skupina A

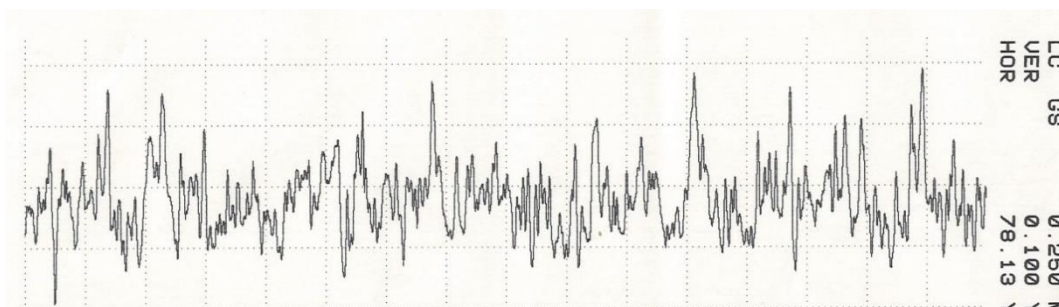
Otisci uzoraka skupine A predstavljaju replike površina obrađene postupcima brušenja i obodnog glodanja. Otisak N2'-A replika je površine N2-A te dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  daje Tablica 34. Parametre mjerenja prikazuje Tablica 33., a grafički prikaz Slika 41.

**Tablica 33. Parametri mjerenja otiska N2'-A**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 34. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N2'-A**

N2'-A		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	43	313
<b>2. trag</b>	43	268
<b>3. trag</b>	49	334
<b>4. trag</b>	45	291
<b>5. trag</b>	49	373



**Slika 41. Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-A**

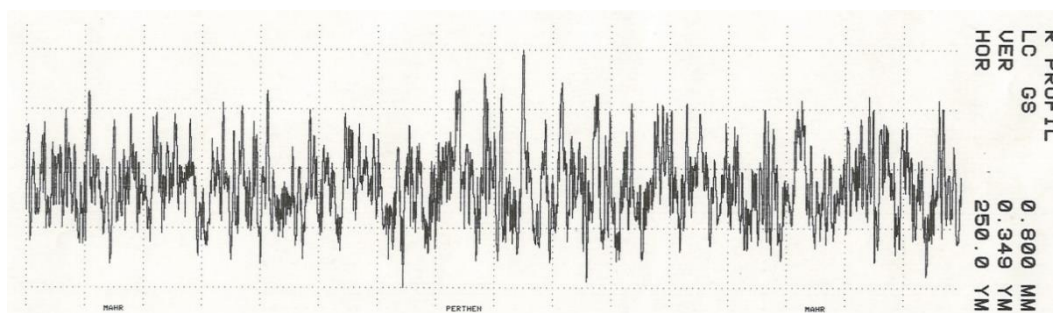
Otisak N4'-A replika je površine N4-A, a Tablica 36. prikazuje dobivene vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$ . Parametre mjerenja prikazuje Tablica 35., a grafički prikaz Slika 42.

**Tablica 35. Parametri mjerenja otiska N4'-A**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 36. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za otisak N4'-A**

N4'-A		
	$Ra$ [nm]	$Rz$ [nm]
<b>1. trag</b>	167	1094
<b>2. trag</b>	184	1257
<b>3. trag</b>	168	1333
<b>4. trag</b>	168	1203
<b>5. trag</b>	166	1286



**Slika 42. Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-A**

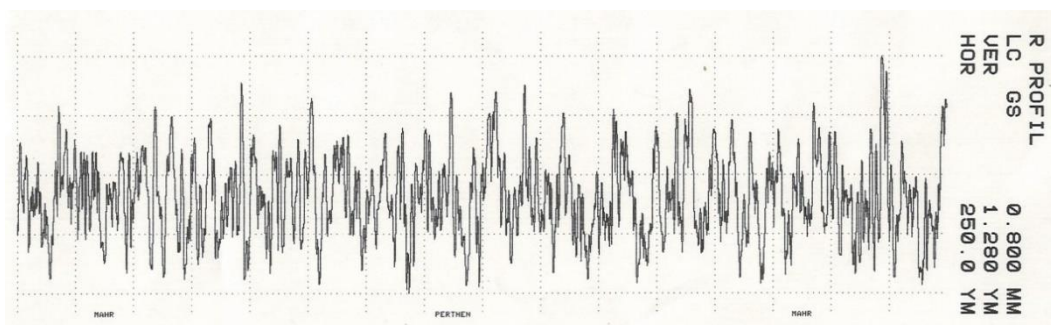
Otisak N6'-A replika je površine uzorka N6-A. Tablica 37. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 38. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 43. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 37. Parametri mjerenja otiska N6'-A**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 38. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N6'-A**

N6'-A		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	751	4706
<b>2. trag</b>	771	5199
<b>3. trag</b>	774	5315
<b>4. trag</b>	742	4934
<b>5. trag</b>	719	4343



**Slika 43. Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-A**



Otisak N8'-A replika je površine uzorka N8-A. Tablica 39. prikazuje parametre mjerenja, a Tablica 40. dobivene vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$ .

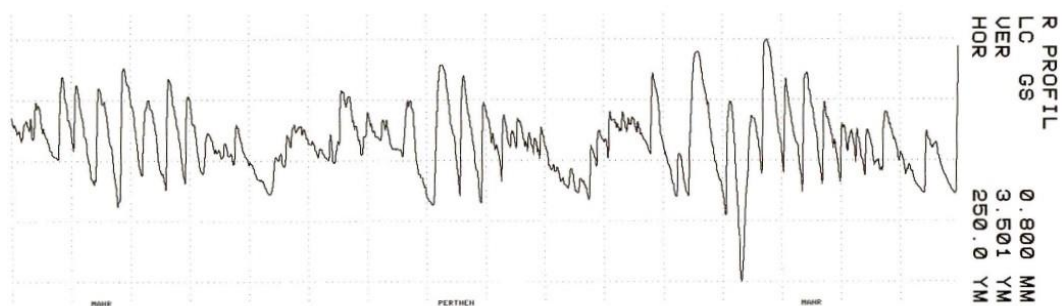
**Tablica 39. Parametri mjerenja uzorka N8'-A**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

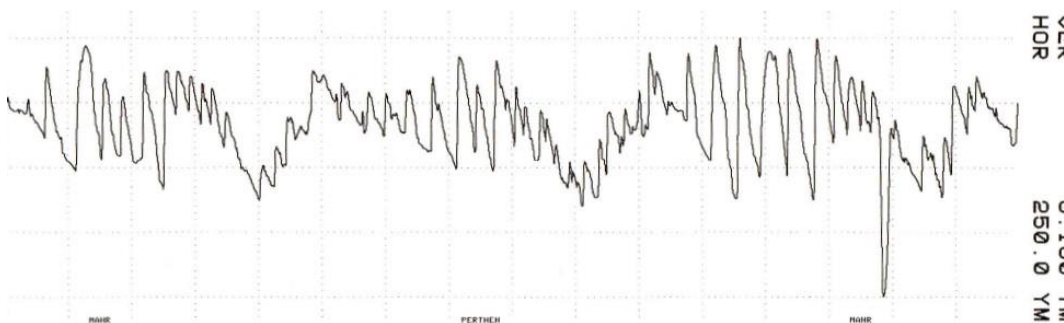
**Tablica 40. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za otisak N8'-A**

N8'-A		
	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	1,488	8,940
<b>2. trag</b>	1,453	7,152
<b>3. trag</b>	1,445	8,286
<b>4. trag</b>	1,596	8,005
<b>5. trag</b>	1,511	8,120

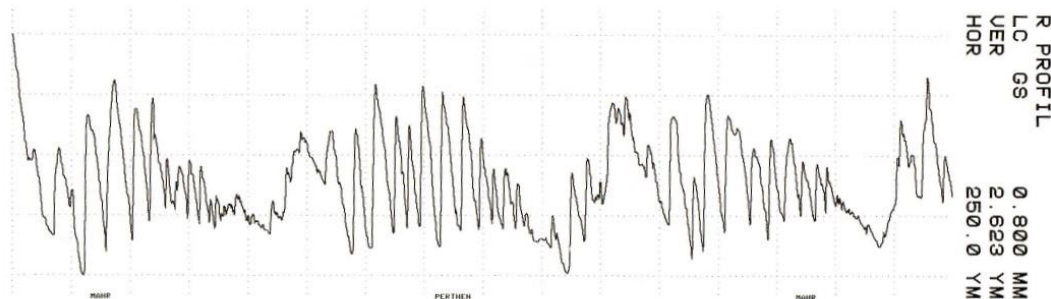
Kao što je površina uzorka N8-A prilikom grafičkog prikaza dala tri različita oblika profila hrapavosti ovisna samo o poziciji uzetog traga, tako je i kod otiska N8'-A prikazano isto. Slika 44., Slika 45. i Slika 46. prikazuju profile hrapavosti prvog, trećeg i petog traga mjerenja.



**Slika 44. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (1. trag)**



**Slika 45. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (3. trag)**



**Slika 46. Dijagram profila hrapavosti uzorka N8'-A (5. trag)**

Otisak N10'-A replika je površine uzorka N10-A. Tablica 41. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 42. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 47. grafički prikaz profila hrapavosti.

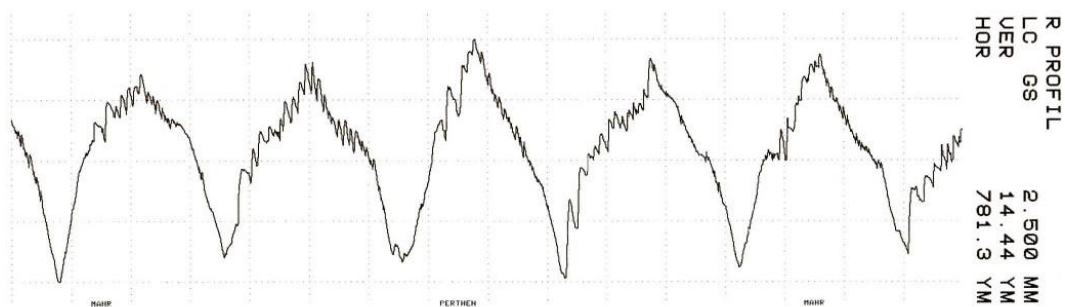
Obzirom da je površina uzorka N10-A neprikladne dimenzije za provedbu mjerenja sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996, isti slučaj ponovio se prilikom mjerenja na replici te površine, odnosno na uzorku N10'-A. Rezultati mjerenja zabilježeni su s napomenom da uvjeti mjerenja nisu u skladu sa zahtjevima norme ISO 4288:1996, te je vertikalni raspon postavljen na 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 41. Parametri mjerenja otiska N10'-A**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

**Tablica 42. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N10'-A**

N10'-A ( $\lambda_c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	9,90	49,19
<b>2. trag</b>	11,24	51,56
<b>3. trag</b>	10,24	48,74
<b>4. trag</b>	10,31	50,00
<b>5. trag</b>	10,04	47,57



**Slika 47. Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-A**

### 6.4.2. Skupina B

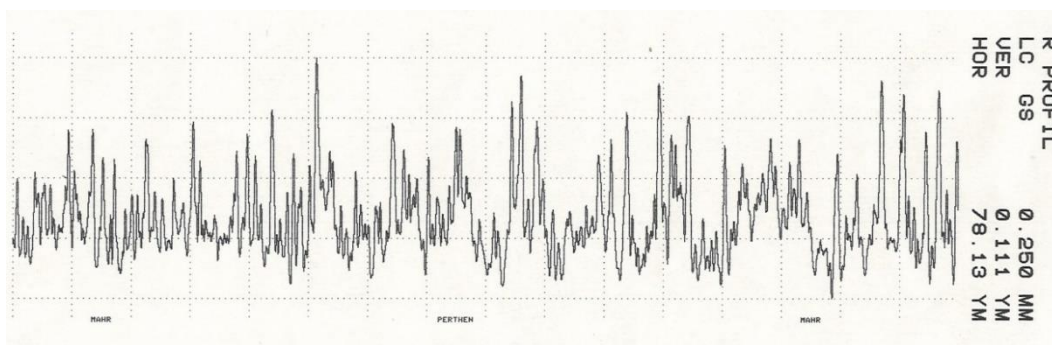
Otisci uzoraka skupine B predstavljaju replike površina obrađene postupcima lepanja i čeonog glodanja. Otisak N2'-B replika je površine N2-B te dobivene vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  prikazuje Tablica 44. Parametre prilikom mjerenja daje Tablica 43., a grafički prikaz Slika 48.

**Tablica 43. Parametri mjerenja otiska N2'-B**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 44. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za otisak N2'-B**

N2'-B		
	$Ra$ [nm]	$Rz$ [nm]
<b>1. trag</b>	51	346
<b>2. trag</b>	55	373
<b>3. trag</b>	52	365
<b>4. trag</b>	56	411
<b>5. trag</b>	56	396



**Slika 48. Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-B**

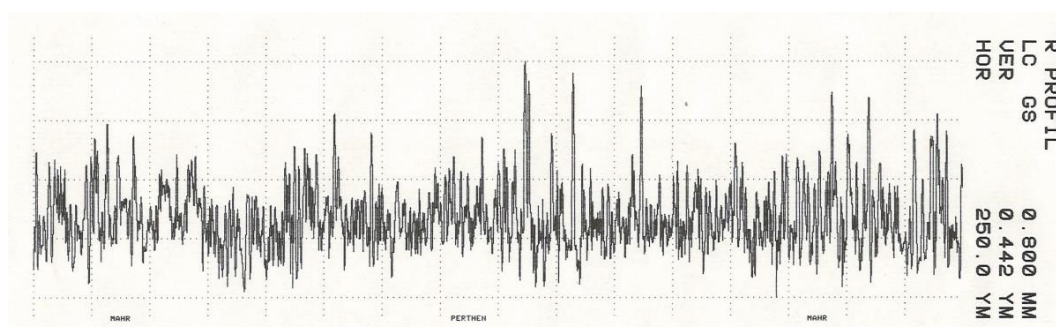
Otisak N4'-B replika je površine uzorka N4-B. Tablica 45. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 46. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 49. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 45. Parametri mjerenja otiska N4'-B**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 46. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N4'-B**

N4'-B		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	187	1453
<b>2. trag</b>	187	1414
<b>3. trag</b>	189	1472
<b>4. trag</b>	195	1471
<b>5. trag</b>	199	1508



**Slika 49. Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-B**

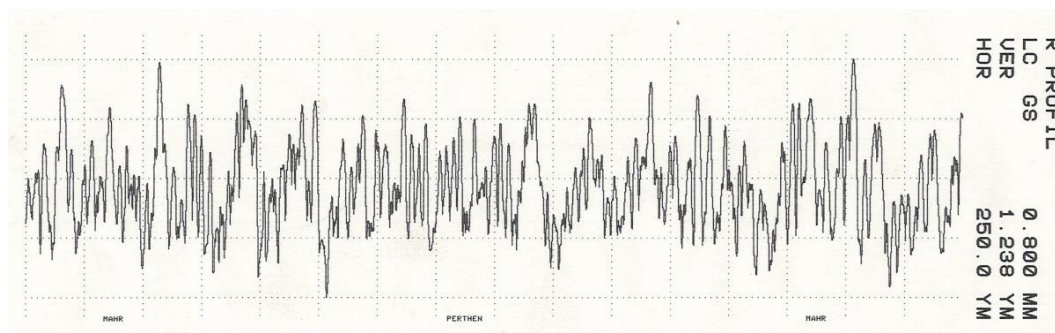
Otisak N6'-B replika je površine uzorka N6-B. Tablica 47. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 48. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 50. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 47. Parametri mjerenja otiska N6'-B**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 48. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N6'-B**

N6'-B		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	719	4214
<b>2. trag</b>	703	4263
<b>3. trag</b>	726	4366
<b>4. trag</b>	724	4373
<b>5. trag</b>	709	4296



**Slika 50. Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-B**

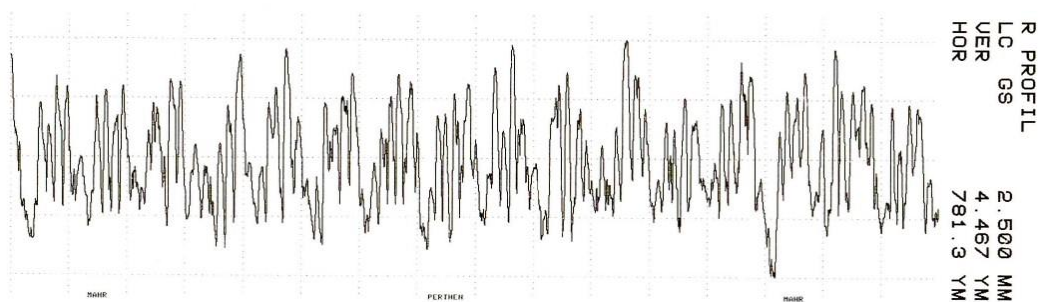
Otisak N8'-B replika je površine uzorka N8-B. Tablica 49. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 50. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 51. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 49. Parametri mjerenja otiska N8'-B**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 50. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N8'-B**

N8'-B		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	2,65	15,44
<b>2. trag</b>	2,89	15,67
<b>3. trag</b>	2,94	19,11
<b>4. trag</b>	2,91	15,37
<b>5. trag</b>	2,99	18,56



**Slika 51. Dijagram profila hrapavosti otiska N8'-B**

Otisak N10'-B replika je površine uzorka N10-B. Tablica 51. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 52. dobivene vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$ , a Slika 52. grafički prikaz profila hrapavosti.

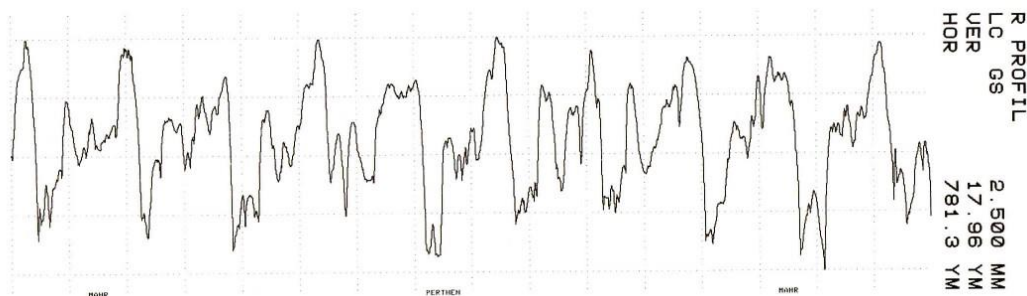
Obzirom da površina uzorka N10-B nije bila prikladna za provedbu mjerenja u skladu sa zahtjevima norme ISO 4288:1996, i na replici površine N10'-B nije bilo moguće ispuniti te zahtjeve. Stoga su rezultati mjerenja zabilježeni uz napomenu da su isti ostvareni ne zadovoljavajući zahtjeve norme ISO 4288:1996, te je vertikalni raspon postavljen na 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 51. Parametri mjerenja otiska N10'-B**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

**Tablica 52. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za otisak N10'-B**

N10'-B ( $\lambda c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	12,91	64,82
<b>2. trag</b>	12,64	64,44
<b>3. trag</b>	11,98	66,09
<b>4. trag</b>	13,14	66,42
<b>5. trag</b>	12,19	66,95



**Slika 52. Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-B**



### 6.4.3. Skupina C

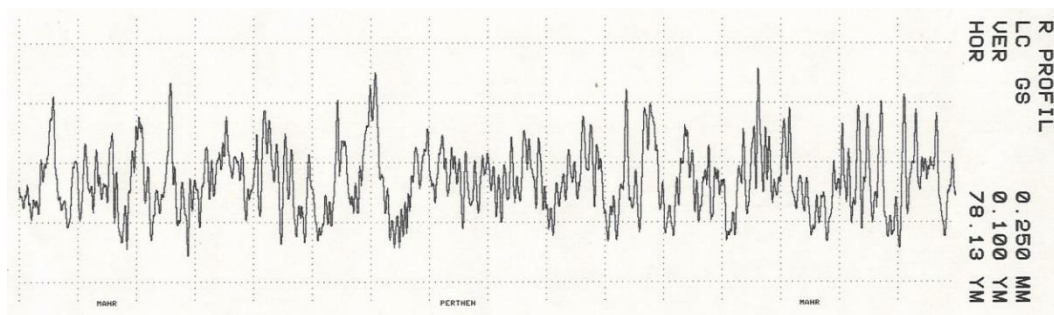
Otisci uzoraka skupine C predstavljaju replike površina obrađene postupcima honanja sa superfinašom i blanjanja/tokarenja. Otisak N2'-C replika je površine N2-C te dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  prikazuje Tablica 54. Parametre mjerenja daje Tablica 53., a grafički prikaz Slika 53.

**Tablica 53. Parametri mjerenja otiska N2'-C**

Cut-off, [mm]	0,25
Duljina ispitivanja, [mm]	1,75
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 54. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N2'-C**

N2'-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	47	306
<b>2. trag</b>	43	265
<b>3. trag</b>	46	285
<b>4. trag</b>	42	265
<b>5. trag</b>	46	307



**Slika 53. Dijagram profila hrapavosti otiska N2'-C**

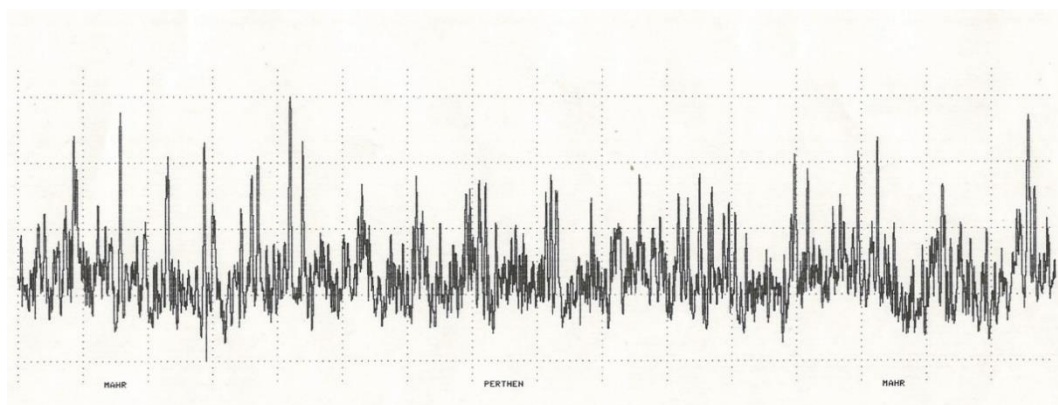
Otisak N4'-C replika je površine uzorka N4-C. Tablica 55. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 56. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 54. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 55. Parametri mjerenja otiska N4'-C**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 56. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N4'-C**

N4'-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	201	1665
<b>2. trag</b>	196	1620
<b>3. trag</b>	195	1651
<b>4. trag</b>	198	1666
<b>5. trag</b>	201	1656



**Slika 54. Dijagram profila hrapavosti otiska N4'-C**

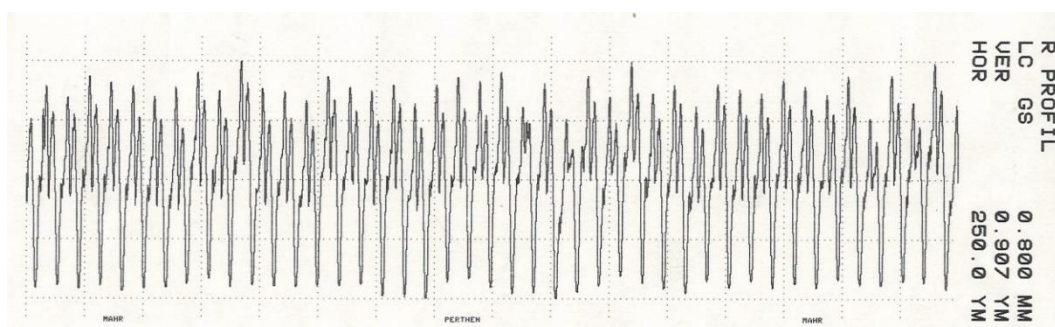
Otisak N6'-C replika je površine uzorka N6-C. Tablica 57. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 58. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 55. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 57. Parametri mjerenja otiska N6'-C**

Cut-off, [mm]	0,8
Duljina ispitivanja, [mm]	5,6
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 58. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N6'-C**

N6'-C		
	$R_a$ [nm]	$R_z$ [nm]
<b>1. trag</b>	672	3475
<b>2. trag</b>	670	3394
<b>3. trag</b>	659	3303
<b>4. trag</b>	656	3316
<b>5. trag</b>	657	3341



**Slika 55. Dijagram profila hrapavosti otiska N6'-C**

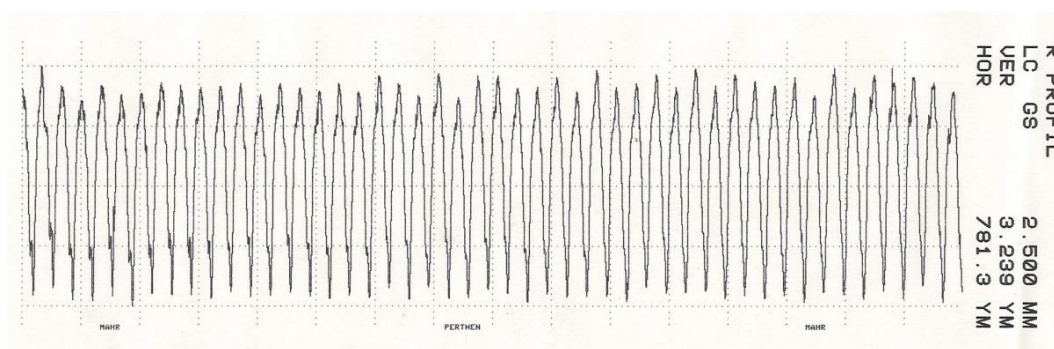
Otisak N8'-C replika je površine uzorka N8-C. Tablica 59. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 60. dobivene vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$ , a Slika 56. grafički prikaz profila hrapavosti.

**Tablica 59. Parametri mjerenja otiska N8'-C**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	12,5

**Tablica 60. Vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za otisak N8'-C**

N8'-C		
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	3,35	17,29
<b>2. trag</b>	3,22	12,52
<b>3. trag</b>	3,20	12,39
<b>4. trag</b>	3,22	13,75
<b>5. trag</b>	3,20	12,43



**Slika 56. Dijagram profila hrapavosti otiska N8'-C**

Otisak N10'-C replika je površine uzorka N10-C. Tablica 61. prikazuje parametre mjerenja, Tablica 62. dobivene vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$ , a Slika 57. grafički prikaz profila hrapavosti.

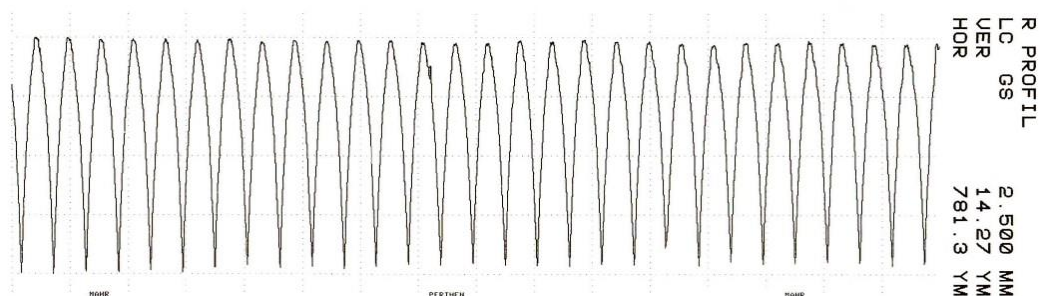
Kako je to bio slučaj prilikom mjerenja na uzorku N10-C, i na replici te površine N10'-C mjerenja nisu provedena sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996, te je postavljen vertikalni raspon na 62,5  $\mu\text{m}$ .

**Tablica 61. Parametri mjerenja otiska N10'-C**

Cut-off, [mm]	2,5
Duljina ispitivanja, [mm]	17,5
Vertikalni raspon, [ $\mu\text{m}$ ]	62,5

**Tablica 62. Vrijednosti parametara  $Ra$  i  $Rz$  za otisak N10'-C**

N10'-C ( $\lambda c$ nije sukladna normi ISO 4288:1996)		
	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>1. trag</b>	13,48	55,2
<b>2. trag</b>	13,51	55,86
<b>3. trag</b>	13,53	55,45
<b>4. trag</b>	13,45	55,64
<b>5. trag</b>	13,59	55,59



**Slika 57. Dijagram profila hrapavosti otiska N10'-C**

## 7. ANALIZA REZULTATA

Kroz analizu prikazane su razne usporedbe vrijednosti rezultata mjerenja uzoraka i otisaka. Uz tablične usporedbe rezultata, prikazane su i grafičke usporedbe profila hrapavosti za svaki uzorak i njegov odgovarajući otisak.

Prvi dio analize predstavlja usporedbu aritmetičkih sredina rezultata mjerenja parametara hrapavosti ostvarenih na ispitnim površinama i otiscima tih površina. Tablica 63. prikazuje prosječne vrijednosti parametara  $R_a$  i  $R_z$  za uzorke i otiske.

**Tablica 63. Usporedba aritmetičkih sredina uzoraka i otisaka**

	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	$R_a$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ , [ $\mu\text{m}$ ]
<b>N2</b>	0,0338	0,3036	0,0514	0,4438	0,0430	0,2784
<b>N2'</b>	0,0458	0,3158	0,0540	0,3782	0,0448	0,2856
<b>N4</b>	0,1622	1,1660	0,1538	1,3638	0,1438	1,5522
<b>N4'</b>	0,1706	1,2346	0,1914	1,4636	0,1982	1,6516
<b>N6</b>	0,6828	4,5984	0,7642	4,6392	0,6736	3,3676
<b>N6'</b>	0,7514	4,8994	0,7162	4,3024	0,6628	3,3658
<b>N8</b>	1,3004	7,2014	3,0340	16,4480	3,3038	12,3800
<b>N8'</b>	1,4986	8,1006	2,8760	16,8300	3,2380	13,6760
<b>N10</b>	14,426	54,634	14,102	64,924	14,530	58,526
<b>N10'</b>	10,346	49,412	12,572	65,744	13,512	55,548

Na temelju usporedbe vrijednosti u prethodnoj tablici, vidljivo je da se radi o relativno malim razlikama prosječnih vrijednosti dobivenih rezultata što pokazuje kako je riječ o kvalitetnoj replikaciji površine.

Idući dio analize predstavlja usporedbu raspona dobivenih vrijednosti rezultata. Ovim podatkom prikazuje se razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti rezultata promatranih parametara  $Ra$  i  $Rz$ . Cilj prikaza raspona je utvrđivanje da li se na otisku narušila ujednačenost strukture koja je bila na originalu. Tablica 64. prikazuje vrijednosti raspona za parametar  $Ra$  pojedinog uzorka odnosno otiska za svaku skupinu obrade, a Tablica 65. za parametar  $Rz$ .

**Tablica 64. Raspon dobivenih rezultata za parametar  $Ra$**

	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	Uzorak	Otisak	Uzorak	Otisak	Uzorak	Otisak
$Ra$ (N2), [nm]	1	6	4	5	7	5
$Ra$ (N4), [nm]	15	18	15	12	14	6
$Ra$ (N6), [nm]	101	55	255	23	30	16
$Ra$ (N8), [ $\mu\text{m}$ ]	0,339	0,151	0,521	0,340	0,120	0,150
$Ra$ (N10), [ $\mu\text{m}$ ]	2,29	1,34	5,08	1,16	0,48	0,14

**Tablica 65. Raspon dobivenih rezultata za parametar  $Rz$**

	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	Uzorak	Otisak	Uzorak	Otisak	Uzorak	Otisak
$Rz$ (N2), [nm]	66	105	68	65	220	42
$Rz$ (N4), [nm]	128	239	358	94	181	46
$Rz$ (N6), [nm]	270	972	1320	159	154	172
$Rz$ (N8), [ $\mu\text{m}$ ]	2,058	1,788	2,350	3,740	0,430	4,900
$Rz$ (N10), [ $\mu\text{m}$ ]	4,61	3,99	17,93	2,51	1,45	0,66

Na temelju podataka prikazanih u prethodno navednim tablicama, zaključeno je kako ujednačenost strukture nije narušena prilikom repliciranja površina uzoraka. Usporedbom raspona za parametar  $R_a$ , kod uzorka N6 i otiska N6' iz skupine A vidljivo je da se radi o nešto većoj vrijednosti u odnosu na ostale iz iste skupine. Usporedbom raspona za parametar  $R_z$ , kod uzorka N6 odnosno otiska N6' te uzorka N10 odnosno otiska N10' iz skupine B, te uzorka N2 odnosno otiska N2' iz skupine C također je primjetna nešto veća vrijednost raspona u odnosu na ostale iz istih skupina.



Sljedeći dio analize predstavlja usporedbu apsolutnih i relativnih razlika aritmetičkih sredina rezultata mjerenja. Apsolutna razlika vrijednosti prikazuje razliku prosječnih vrijednosti mjerenja uzoraka i otisaka. Relativna razlika vrijednosti prikazuje omjer apsolutne razlike i srednje vrijednosti aritmetičkih sredina rezultata uzoraka i otisaka. Tablica 66. prikazuje apsolutne razlike za parametre  $Ra$  i  $Rz$ , dok Tablica 67. prikazuje relativne razlike za iste parametre.

**Tablica 66. Apsolutne razlike vrijednosti rezultata mjerenja**

	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	$\Delta Ra$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta Rz$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta Ra$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta Rz$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta Ra$ , [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta Rz$ , [ $\mu\text{m}$ ]
<b>N2</b>	0,0120	0,0122	0,0026	0,0656	0,0018	0,0072
<b>N4</b>	0,0084	0,0686	0,0376	0,0998	0,0544	0,0994
<b>N6</b>	0,0686	0,3010	0,0480	0,3368	0,0108	0,0018
<b>N8</b>	0,1982	0,8992	0,1580	0,3820	0,0658	1,2960
<b>N10</b>	4,080	5,222	1,530	0,820	1,018	2,978

**Tablica 67. Relativne razlike vrijednosti rezultata mjerenja**

	Skupina A		Skupina B		Skupina C	
	$R(Ra)$ , [%]	$R(Rz)$ , [%]	$R(Ra)$ , [%]	$R(Rz)$ , [%]	$R(Ra)$ , [%]	$R(Rz)$ , [%]
<b>N2</b>	30,2	3,9	4,9	15,9	4,1	2,6
<b>N4</b>	5,1	5,7	21,8	7,1	31,8	6,2
<b>N6</b>	9,6	6,3	6,5	7,5	1,6	0,1
<b>N8</b>	14,2	11,8	5,4	2,3	2,0	9,9
<b>N10</b>	32,9	10,0	11,5	1,3	7,3	5,2

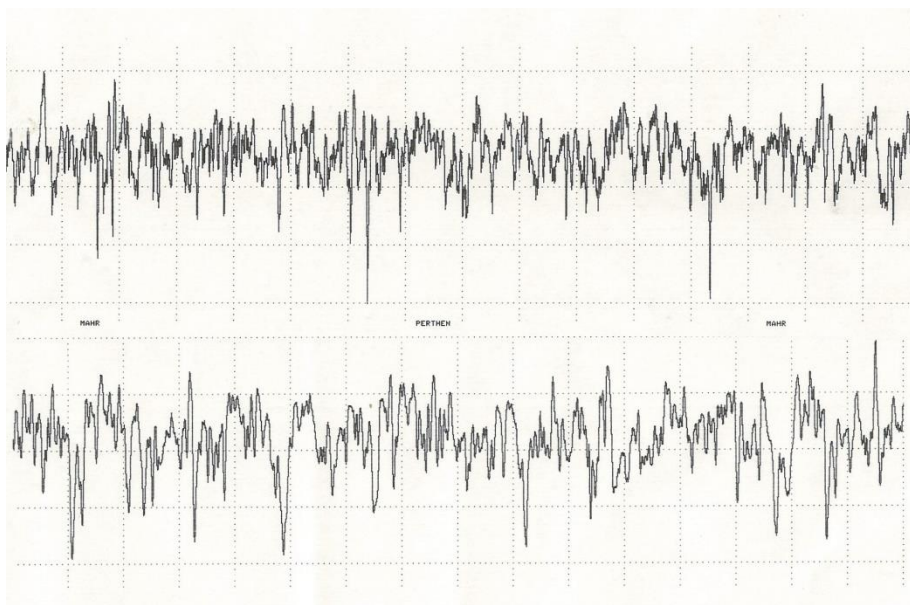
Apsolutne razlike vrijednosti prikazane su u mikrometrima, a relativne razlike u postotcima. Iz priloženih podataka u prethodnim tablicama, jasno je kako se radi o vrlo malim apsolutnim razlikama u vrijednostima rezultata mjerenja uzoraka i otisaka. Najveće razlike pojavljuju se kod površina N10.

Podaci o relativnim razlikama u vrijednostima mjerenja pokazuju kako postotak za parametar  $R_a$  ne prelazi 33%. Izdvojene su površine N2 i N10 iz skupine A, N4 iz skupine B, te N4 iz skupine C. Navedene površine odstupaju zbog znatno većeg postotka relativnih razlika. Za površinu N2-A postotak relativne razlike iznosi 30,2%, za površinu N10-A iznosi 32,9%, za površinu N4-B iznosi 21,8%, te za površinu N4-C postotak relativne razlike iznosi 31,8%. Preostale površine iz sve tri skupine ne prelaze iznos od 15%.

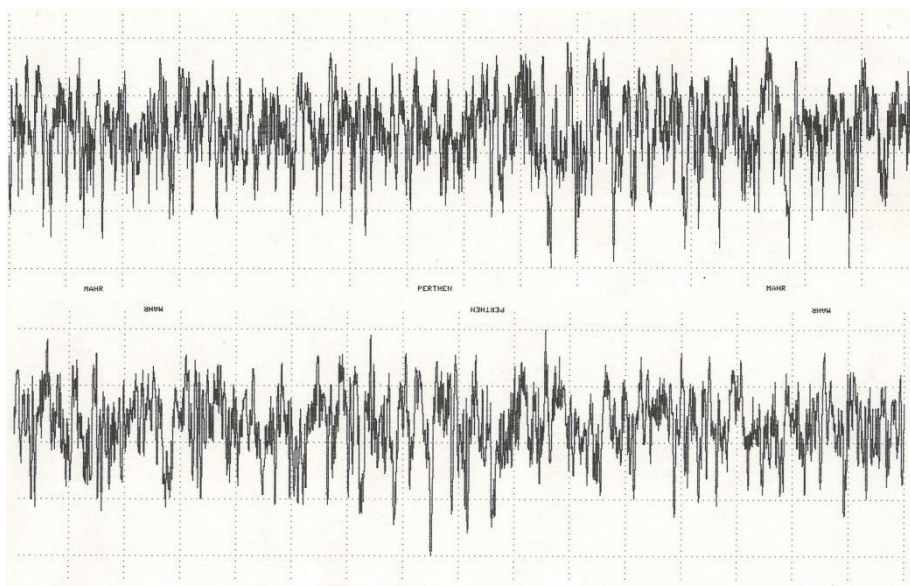
Vrijednosti relativnih razlika za parametar  $R_z$  prema podacima u prethodno navedenoj tablici ne prelazi 16%. Potrebno je izdvojiti površine N8-A, N10-A i N2-B zato što jedino njihove vrijednosti relativnih razlika prelaze iznos od 10%. Također, potrebno je izdvojiti i površinu N6-C čija relativna razlika iznosi 0,1% što je pokazatelj vrlo kvalitetne replikacije ove površine.

Na temelju svih navedenih podataka i rezultata, može se zaključiti kako se radi o vrlo kvalitetnom materijalu za uzimanje otisaka u svrhu mjerenja hrapavosti površina. U nastavku analize, prikazane su grafičke usporedbe profila hrapavosti uzoraka i otisaka. Obzirom da otisak daje zrcaljenu površinu uzorka, dijagrami profila hrapavosti otisaka zakrenuti su za 180 stupnjeva radi jednostavnije usporedbe.

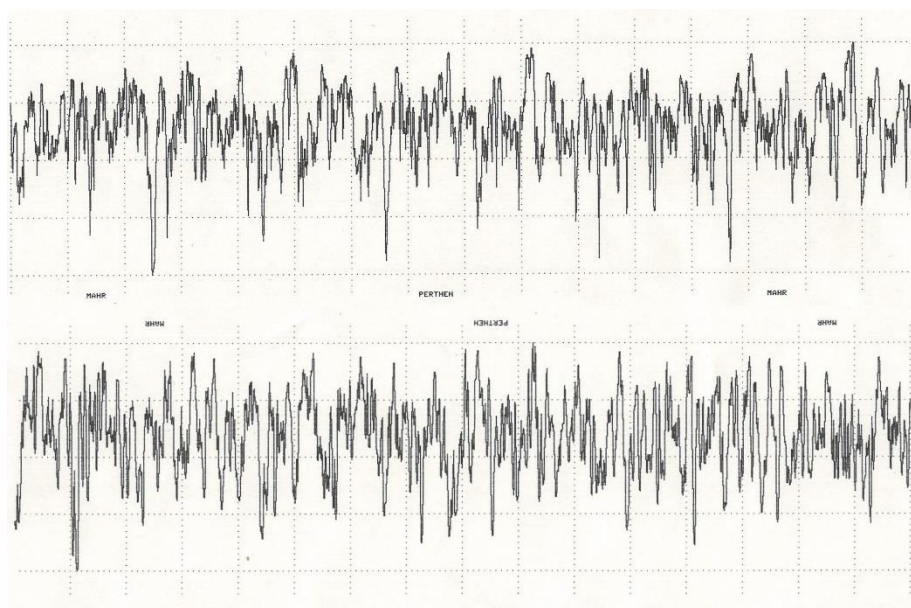
Na idućim slikama prikazane su grafičke usporedbe profila hrapavosti uzoraka i otisaka iz skupine A strojne obrade. Gornji dijagrami predstavljaju profile uzoraka, a donji profile otisaka. Za površine N8 odnosno N8' prikazane su usporedbe profila prvog, trećeg i petog traga mjerenja.



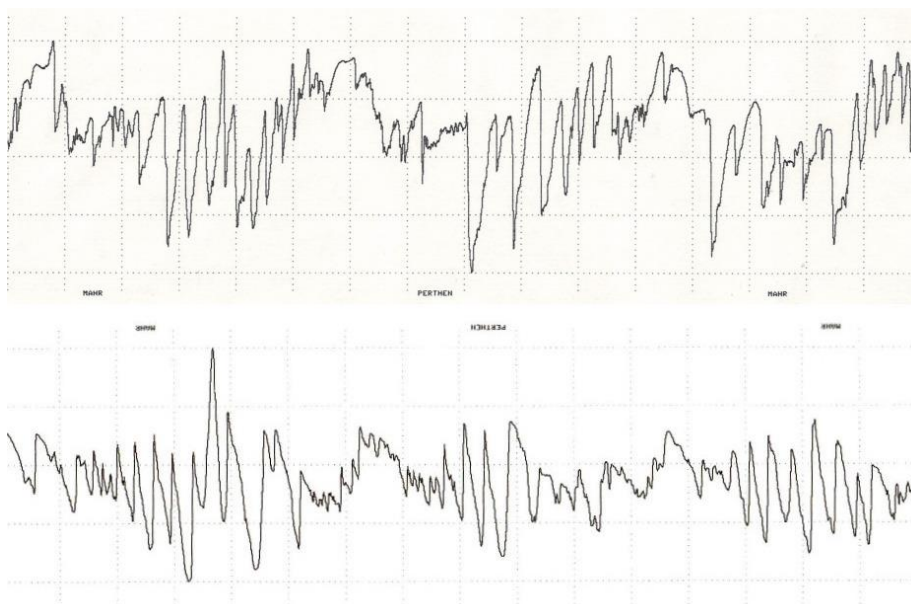
**Slika 58. Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-A i otiska N2'-A**



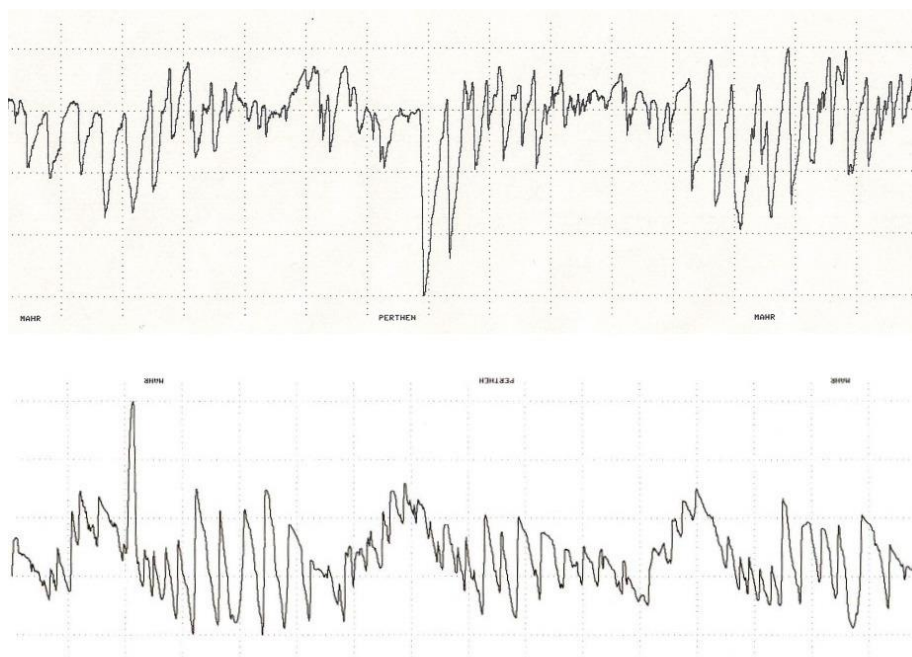
**Slika 59. Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-A i otiska N4'-A**



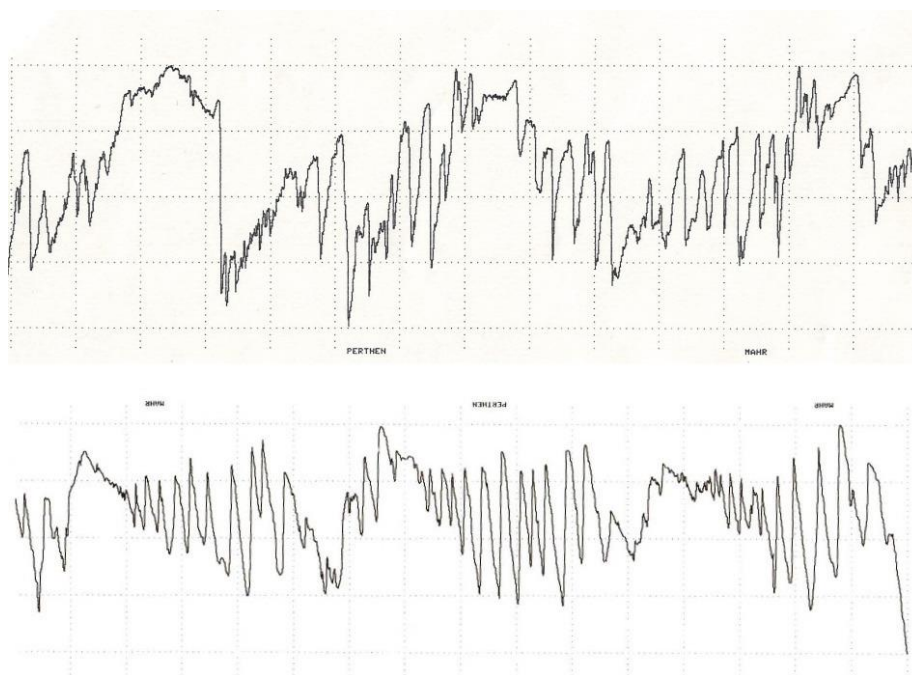
**Slika 60. Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-A i otiska N6'-A**



**Slika 61. Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (1. trag)**

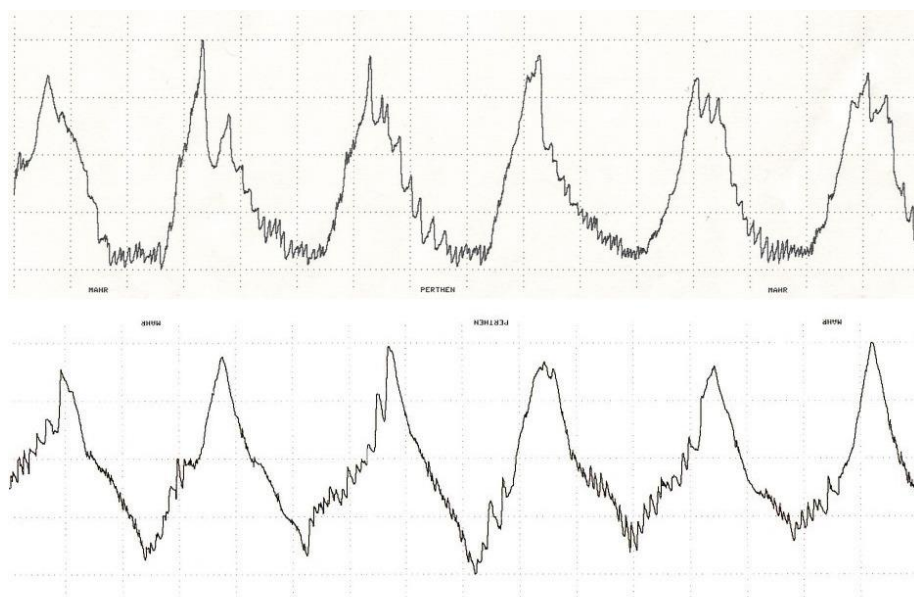


**Slika 62.** Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (3. trag)



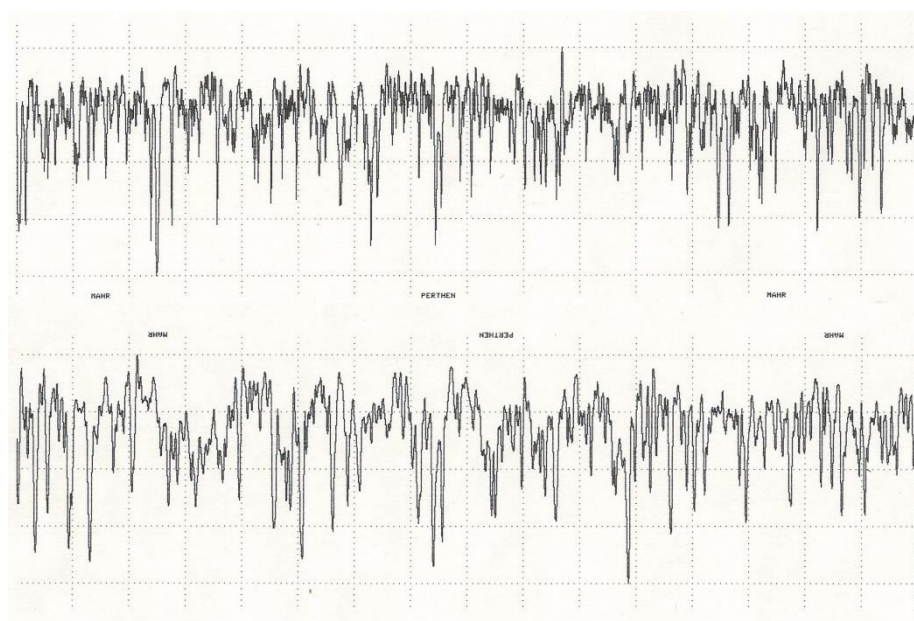
**Slika 63.** Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-A i otiska N8'-A (5. trag)



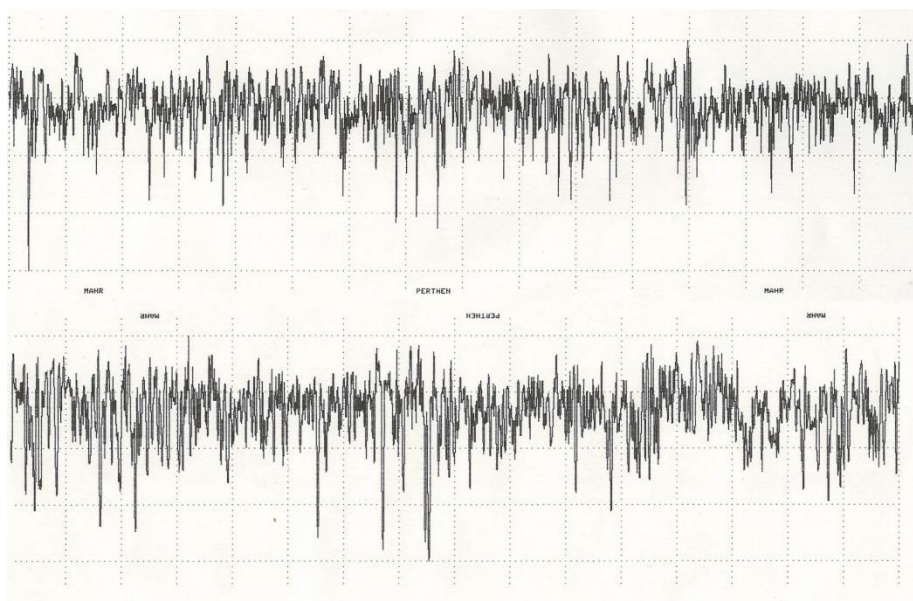


**Slika 64. Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-A i otiska N10'-A**

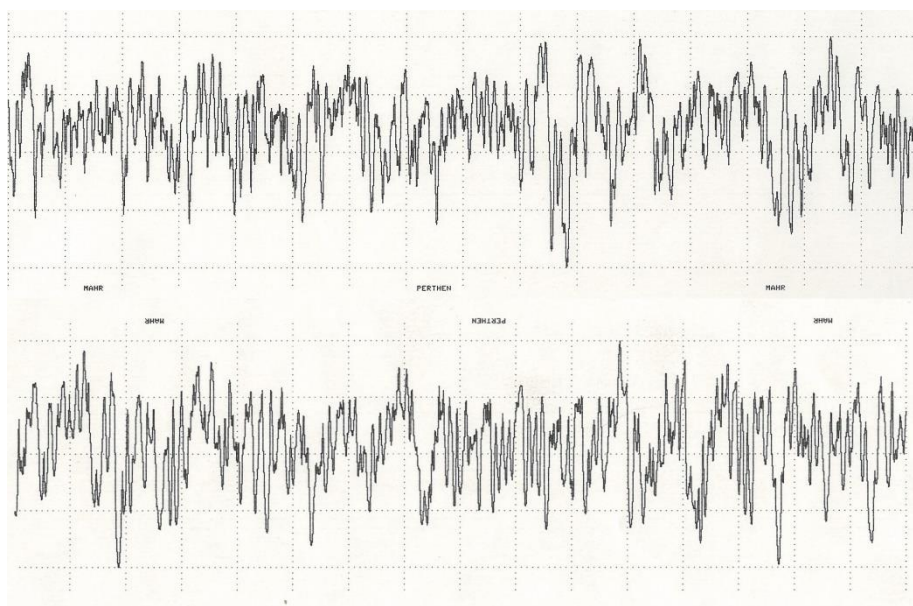
Sljedeće slike prikazuju grafičke usporedbe profila hrapavosti za uzorke i otiske skupine B. Kao na prethodnim slikama, gornji dijagrami su profili hrapavosti uzoraka i donji profili hrapavosti otisaka.



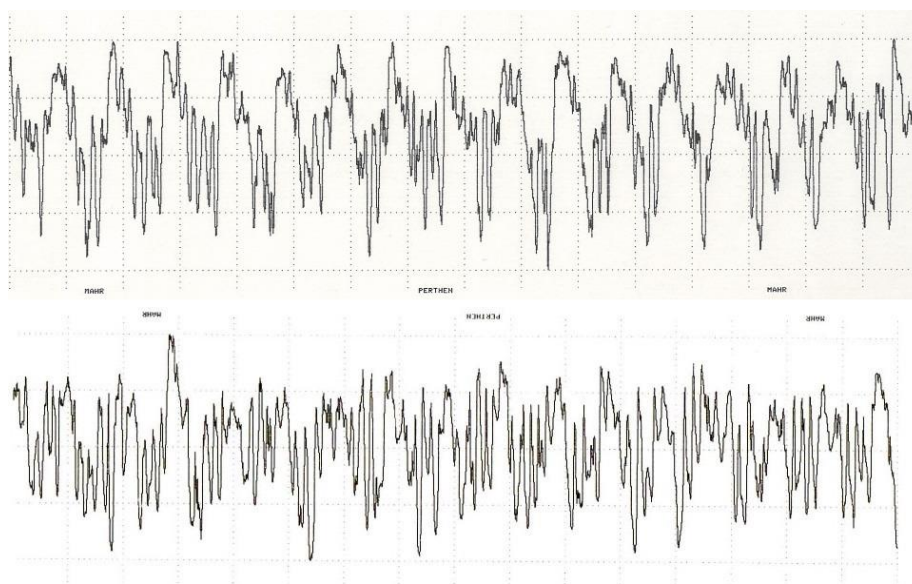
**Slika 65. Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-B i otiska N2'-B**



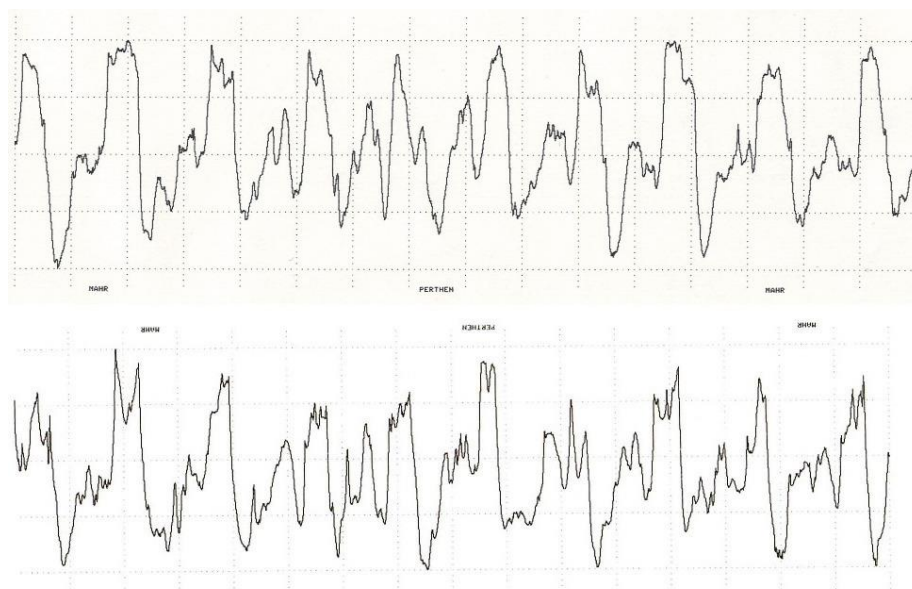
**Slika 66. Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-B i otiska N4'-B**



**Slika 67. Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-B i otiska N6'-B**



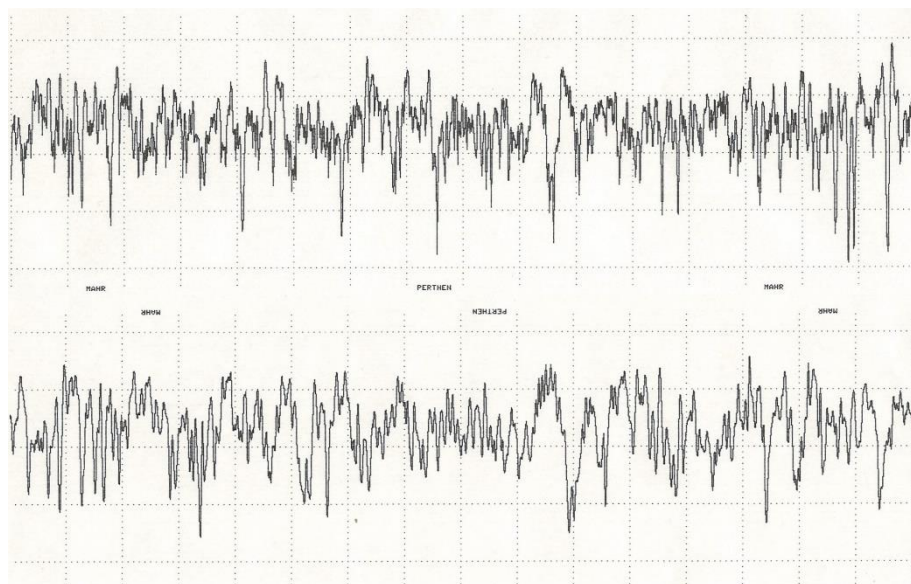
**Slika 68. Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-B i otiska N8'-B**



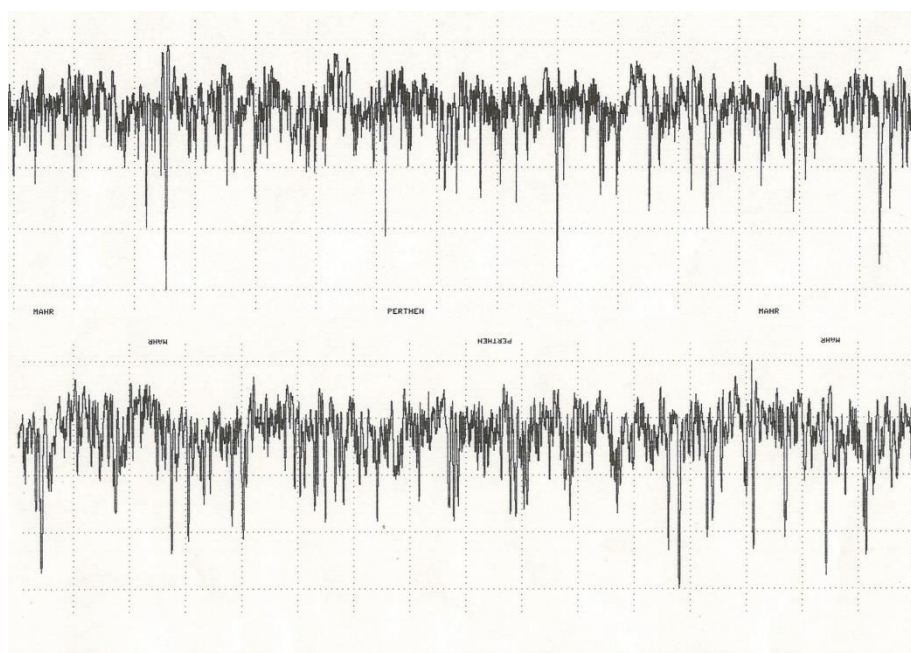
**Slika 69. Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-B i otiska N10'-B**



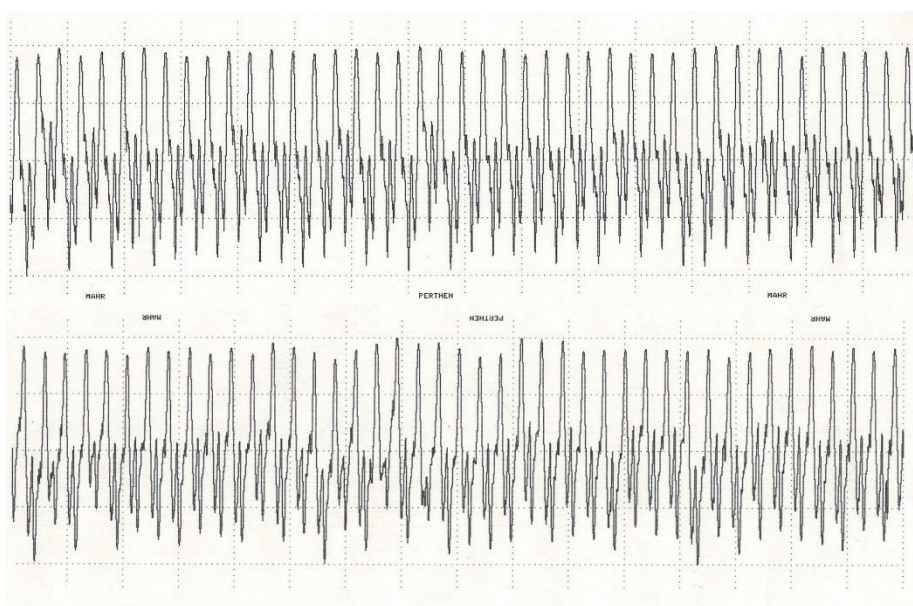
Na idućim slikama prikazane su grafičke usporedbe profila hrapavosti uzoraka i otisaka iz skupine C strojne obrade. Kao na slikama prethodnih skupina, gornji dijagrami predstavljaju profile uzoraka dok donji dijagrami profile hrapavosti otisaka.



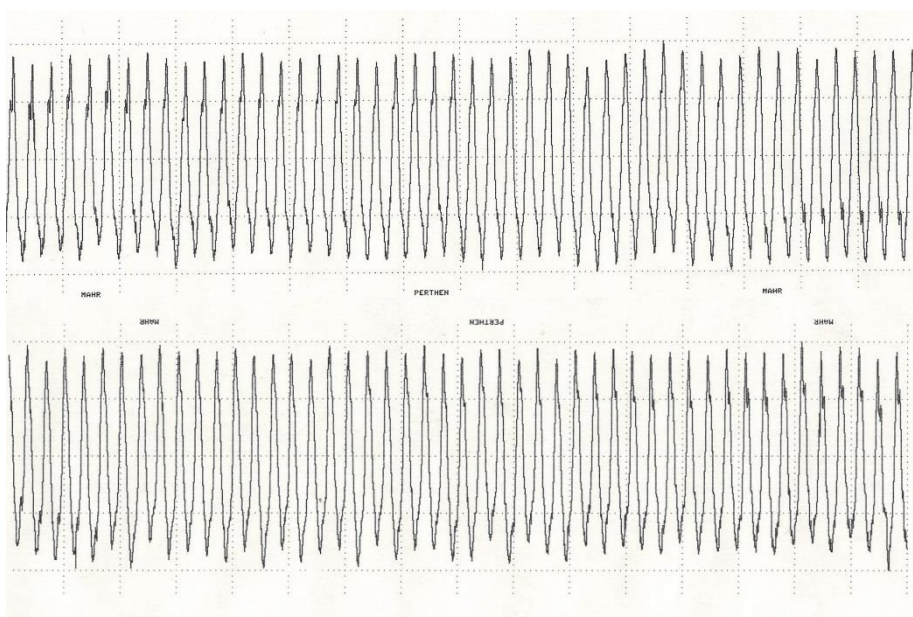
**Slika 70. Usporedba profila hrapavosti uzorka N2-C i otiska N2'-C**



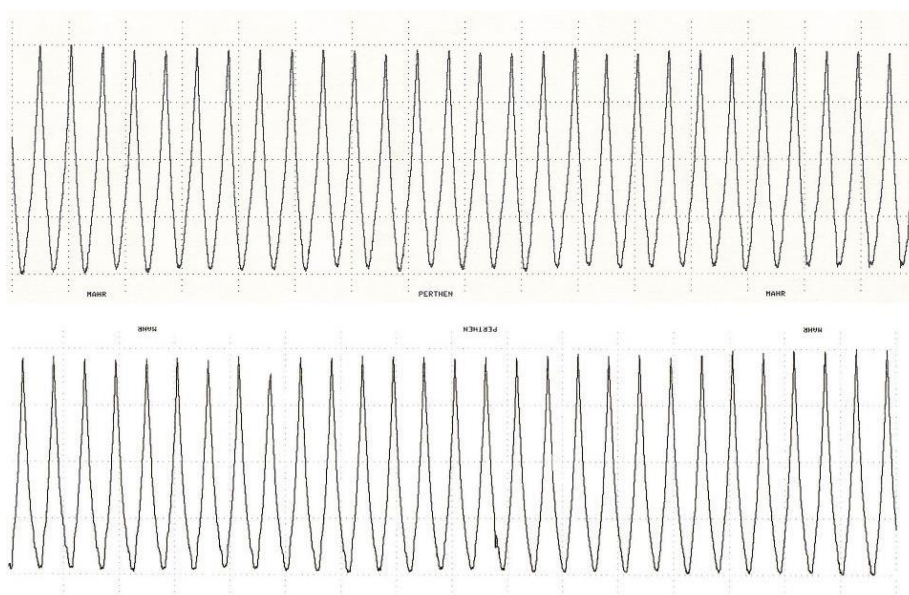
**Slika 71. Usporedba profila hrapavosti uzorka N4-C i otiska N4'-C**



**Slika 72. Usporedba profila hrapavosti uzorka N6-C i otiska N6'-C**



**Slika 73. Usporedba profila hrapavosti uzorka N8-C i otiska N8'-C**



**Slika 74. Usporedba profila hrapavosti uzorka N10-C i otiska N10'-C**

Na temelju grafičkih usporedbi profila hrapavosti, jasno je kako se radi o iznimno kvalitetnom materijalu za otiske s vrlo visokom točnošću replikacije. Usporedbe profila pokazuju vrlo bliske geometrijske sličnosti površina što je ujedno potvrđeno numeričkim podacima. Vrlo kvalitetni primjeri su usporedbe profila uzoraka i otisaka iz skupine C gdje je „na oko“ razlika teško primjetna. Naravno, profili hrapavosti ne mogu biti identični obzirom da tragovi prilikom mjerenja uzoraka i otisaka nisu uzeti s identičnih pozicija. Međutim, može se zaključiti kako visoka točnost repliciranja koju pokazuje *Technovit 3040*, osigurava iznimnu kvalitetu replika dobivenih korištenjem ovog materijala.

Velik utjecaj na kvalitetu površine otiska imala je i kvaliteta izvođenja procesa replikacije. Specifično za slučaj ovog eksperimentalnog dijela, uočen je problem pojave zračnih mjehura unutar replike. Pretpostavka je da se pojava zračnih mjehura dogodila prilikom miješanja praškaste i tekuće komponente mase za otiske, ili njenog izlivanja u kalup s uzorcima. Utjecaj zračnih mjehura bio je značajan za proces mjerenja zbog uzrokovanja neregularnih mjerenja. Prilikom prolaska igle ticala mjernog uređaja preko traga na kojem se nalazio zračni mjehur, profil hrapavosti izašao bi van postavljenog vertikalnog raspona što bi rezultiralo prekidom trenutnog mjerenja. Uzrok tome je pomak igle ticala prenisko ili previsoko u odnosu na postavljene granice mjerenja. Posljedica ovog problema očituje se u smanjenju površine potrebne za uzimanje traga mjerenja u svrhu izbjegavanja zračnih mjehura i neregularnih mjerenja. Primjer zračnih mjehura unutar replike prikazuje Slika 75. na kojoj su jasno vidljive bijele točkice koje predstavljaju zračne mjehure.



**Slika 75. Zračni mjehuri unutar replike**



---

## 8. ZAKLJUČAK

Primjena otisaka u području mjerenja hrapavosti površina kroz razna istraživanja pokazala se kao pouzdana metoda nedestruktivnog indirektnog mjerenja. Naime, unatoč mnogobrojnim prednostima koje pruža ova metoda, i dalje se nameću razne zapreke i nedostaci. Glavni problem koji se postavlja pred spomenutu metodu je odabir prikladnog materijala za otiske. Pregledom literature pokazalo se da postoje razne vrste materijala za replike, međutim svaka vrsta prikladna je za određene metode mjerenja hrapavosti. Najčešći faktori prilikom izbora materijala za otiske bili su kvaliteta, tj. točnost repliciranja i odabrana metoda mjerenja. Pojedine replike prikladne su za određene metode mjerenja što je uvjetovano tvrdoćom materijala replike. Ovisno radi li se o beskontaktnoj ili kontaktnoj metodi mjerenja, izabrat će se replika prikladne tvrdoće. Cilj ovog diplomskog rada bio je pronaći materijal za izradu otisaka prikladan za kontaktno mjerenje površinske hrapavosti koristeći 2D uređaj s ticalom, a potom utvrditi kvalitetu repliciranja površina odabranog materijala.

Za potrebe eksperimentalnog dijela rada, kao uzorci korištene su pločice s različito obrađenim površinama. Uzorci su obrađeni klasičnim strojnim postupcima podijeljeni u 3 skupine. Iz svake skupine izdvojeno je po 5 površina različitih stanja hrapavosti, a na svakoj površini provedeno po 5 mjerenja, što rezultira sa 75 provedenih mjerenja sveukupno. Pregledom literature i najčešće korištenih replika, kao materijal za otiske odabrana je dvokomponentna smola *Technovit 3040*. Promatrani parametri prilikom mjerenja bili su amplitudni 2D parametri hrapavosti  $R_a$  i  $R_z$ . Sva mjerenja provedena su sukladno relevantnim normama. Prvo su provedena mjerenja hrapavosti površina uzoraka, potom je slijedila priprema mase za otiske prema uputama proizvođača, te su naposljetku provedena mjerenja na dobivenim replikama. Konačni rezultati analizirani su putem uspoređivanja vrijednosti aritmetičkih sredina, raspona dobivenih vrijednosti, apsolutnih i relativnih razlika, te grafičkom usporedbom dijagrama profila hrapavosti uzoraka i otisaka.

Analiza ostvarenih rezultata pokazala je kako *Technovit 3040* pruža otiske površina visoke kvalitete i točnosti što je potvrđeno numeričkim podacima parametara  $R_a$  i  $R_z$ , te vizualnom usporedbom dijagrama profila hrapavosti.

Prilikom mjerenja otisaka, uočen je problem u obliku pojave zračnih mjehura unutar replika. Za uzrok pojave zračnih mjehura pretpostavka je da se radi o pogrešci kod pripreme mase za otiske ili kod postupka izlivanja mase u kalup. Sukladno tome, postoji mogućnost da je pojava zračnih mjehura problem jednostavnog rješenja.

Unatoč prethodno navedenim problemima prilikom eksperimentalnog dijela, na temelju ostvarenih rezultata i njihove analize može se zaključiti da je *Technovit 3040* vrlo kvalitetan materijal za uzimanje otisaka i prikladan za mjerenje hrapavosti kontaktnim metodama.

---

**LITERATURA**

- [1] Grbavac, M.: *Završni rad: Prijedlog proširenja etalnoske baze za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [2] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [3] Leach, R.: *The measurement of surface texture using Stylus instruments*, University of Nottingham, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2014.
- [4] Grbavac, M.: *Diplomski rad: Nadogradnja uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [5] Baruffi, F., Parenti, P., Cacciatore, F., Annoni, M., Tosello G.: *On the Application of Replica Molding Technology for the Indirect Measurement of Surface and Geometry of Micromilled Components*, Technical University of Denmark, Danska, Politecnico di Milano, Italija, 2017.
- [6] Szawara, P., Ostrowski, R.: *“The replication method to analyze roughness of shaft, tool, and grinding wheel microgeometry”*, Rzeszow University of Technology, Poljska, 2020.
- [7] Charola, A. E., Grissom, C. A., Evin Erder, E., Wachowiak, M. J., Oursler, D.: *“Measuring surface roughness: three techniques”*, 1996.
- [8] Liu, Y. C., Ling, C. Y., Malcom, A. A., Dong, Z. G.: *“Accuracy of replication for non-destructive surface finish measurement”*, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapur, 2011.
- [9] [https://www.kulzer-technik.com/en\\_kt/kt/ueber\\_division\\_technik/geschichte/division\\_technik\\_historie.aspx](https://www.kulzer-technik.com/en_kt/kt/ueber_division_technik/geschichte/division_technik_historie.aspx)  
(preuzeto 26.10.2022.)
- [10] [https://www.kulzer-technik.com/en\\_kt/kt/metallographie/produktbereiche/abdruckverfahren\\_1/technovit\\_30\\_40.aspx](https://www.kulzer-technik.com/en_kt/kt/metallographie/produktbereiche/abdruckverfahren_1/technovit_30_40.aspx) (preuzeto 26.10.2022.)
- [11] ISO 4288:1996: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*