

Analiza oštećenja pogonskog vratila

Jakovljević, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:469541>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Jakovljević

Zagreb, 2021.

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. profesor

Student:

Mislav Jakovljević

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru na pomoći, strpljenju, savjetima i svim oblicima suradnje tijekom izrade ovoga rada. Također zahvaljujem osoblju Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratorija za materijalografiju na pomoći i korisnim savjetima tijekom provođenju eksperimentalnog dijela rada. Posebno želim zahvaliti mojoj obitelji, bez čije pomoći, potpore i savjeta ništa od ovoga nebi bilo moguće. Svatko od njih pomogao mi je na sebi specifičan način, i bio vjetar u leđa kada je bilo najpotrebnije. I na kraju, hvala svim mojim prijateljima i Društvu, koji su uvijek bili tu i spremni pomoći na bilo koji način.

Mislav Jakovljević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MISLAV JAKOVLJEVIĆ** Mat. br.: 0035202858

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza oštećenja pogonskog vratila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Drive shaft fracture analysis**

Opis zadatka:

Pogonska vratila glavni su strojni dijelovi koji služe za prijenos zakretnog momenta i snage između pogonskog i pogonjenog uređaja. Zbog svoje izloženosti različitim vrstama statičkih i dinamičkih naprezanja tijekom eksploatacije postoji realna opasnost od pojave oštećenja čijim propagiranjem može doći do havarije.

U radu je potrebno sljedeće:

1. Opisati postupak analize uzroka oštećenja i lomova strojnih dijelova nastalih tijekom eksploatacije.
2. Opisati zahtjeve koji se postavljaju na materijal za izradu pogonskih vratila za generatore velikih snaga.
3. U eksperimentalnom dijelu je potrebno provesti materijalografsku i fraktografsku analizu oštećenja pogonskog vratila kod kojeg su nastala oštećenja tijekom eksploatacije.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

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

Zadatak zadan:

4. ožujka 2021.

Zadatak zadan

prof. dr. sc. Željko Alar

Rok predaje rada:

6. svibnja 2021.

Predviđeni datum obrane:

10. svibnja do 14. svibnja 2021.

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:.....	IV
POPIS SLIKA:.....	VI
POPIS TABLICA:	IX
POPIS OZNAKA:.....	X
SAŽETAK:	XI
SUMMARY:.....	XII
1 UVOD.....	1
2 UMOR MATERIJALA	2
2.1 Općenito o umoru materijala.....	2
2.2 Umor materijala uzrokovan torzijskim naprezanjem (uvijanje)	8
3 PROCEDURA ANALIZE KVAROVA I OŠTEĆENJA	11
4 POGONSKA VRATILA GENERATORA VELIKIH SNAGA.....	14
5 EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	15
5.1 Plan ispitivanja.....	15
5.2 Vizualna kontrola	15
5.2.1 Analiza golim okom i fotografiranje cijelog vratila	15
5.2.2 Analiza ureza povećalom.....	17
5.3 Mjerenje hrapavosti površine R_a	20
5.3.1 Mjerenje hrapavosti – segment A	20
5.3.2 Mjerenje hrapavosti – segment B	23
5.4 Površinsko mjerenje tvrdoće HV10	25
5.5 Površinsko određivanje kemijskog sastava.....	29
5.6 Slamanje vratila i čišćenje prijelomne površine.....	32
5.6.1 Slamanje vratila	32

5.6.2	Čišćenje prijelome površine.....	33
5.7	Izrezivanje dijelova prijelomne površine	34
5.8	Makrofotografiranje	35
5.9	Stereomikroskopija.....	39
5.10	Izrezivanje i priprema uzoraka za metalografska ispitivanja	41
5.10.1	Izrezivanje uzoraka	41
5.10.2	Pripremanje uzorka za metalografiju	41
5.11	Metalografija – određivanje mikrostrukture	46
5.12	Određivanje kemijskog sastava.....	51
5.13	Mjerenje tvrdoće	51
5.14	Skenirajući elektronski mikroskop – SEM Analiza	53
6	ANALIZA REZULTATA.....	55
6.1	Usporedba kemijskog sastava	55
6.2	Usporedba izmjerene i deklarirane tvrdoće.....	56
6.3	Makroskopska analiza – vizualna kontrola	57
6.4	Stereomikroskopija.....	57
6.5	Metalografija	58
6.6	Skenirajući elektronski mikroskop – SEM analiza	60
7	ZAKLJUČAK.....	63
8	LITERATURA	64
9	PRILOZI.....	65

POPIS SLIKA:

Slika 1. Shematski prikaz prijelomne površine uzrokovane umorom materijala [1].....	2
Slika 2. Shematski prikaz propagacije pukotine do loma [1]	3
Slika 3. Konstrukcijski koncentrador naprezanja [1].....	4
Slika 4. Tehnološki koncentrador naprezanja [1]	4
Slika 5. Wöhler -ov dijagram [1]	5
Slika 6. Smith-ov dijagram [1].....	6
Slika 7. Izgled prijelomne površine ovisno o vrsti naprezanja [2]	7
Slika 8. Nazubljena linija između dva izvora pukotine [3].....	8
Slika 9. Oblik presjeka nazubljenih linija ovisno o opterećenju [3]	9
Slika 10. „Riječne linije“ na skici presjeka [3]	9
Slika 11. Utjecaj koncentratora naprezanja na oblik prijelomne površine [3].....	10
Slika 12. Prijelomne površine pri torzijskom naprezanju [3]	10
Slika 13. Djelovanje zarez a i tok sila u vratilima [5].....	14
Slika 14. Tehnički crtež vratila – ilustracija	16
Slika 15. Oštećeno pogonsko vratilo	16
Slika 16. Ilustrativni 3D model pogonskog vratila	17
Slika 17. "Segmenti" vratila.....	17
Slika 18. Urezi po opsegu vratila.....	18
Slika 19. Vizualna kontrola ureza pomoću osvijetljenog povećala	18
Slika 20. Mjerni listići za određivanje radijusa	19
Slika 21. Određivanje koeficijenta koncentracije naprezanja [6]	19
Slika 22. Prijenosni mjerač hrapavosti Taylor Hobson Surtronic DUO	20
Slika 23. Segment A, referentna površina, pukotina s gornje strane	21
Slika 24. Segment A, hrapava površina, pukotina s gornje strane.....	21
Slika 25. Segment A, referentna površina, pukotina s donje strane	21
Slika 26. Segment A, hrapava površina, pukotina s donje strane	21
Slika 27. Sektori segmenta B, sektor A - žuto, sektor B – crveno.....	23
Slika 28. Segment B, sektor A, referentna površina	24
Slika 29. Segment B, sektor A, blago oštećena površina.....	24

Slika 30. Segment B, sektor B, referentna površina	24
Slika 31. Segment B, sektor B, blago oštećena površina.....	24
Slika 32. Prijenosni tvrdomjer Krautkramer	26
Slika 33. Mjerenje tvrdoće HV10, segment A, referentna površina	27
Slika 34. Mjerenje tvrdoće HV10, segment A, blago oštećena površina	27
Slika 35. Mjerenje tvrdoće HV10, segment B, blizina pukotine	27
Slika 36. Mjerenje tvrdoće HV10, segment C	27
Slika 37. Mjerenje tvrdoće HV10, segment D.....	28
Slika 38. Olympus XRF analizator	29
Slika 39. Mjesta ispitivanja kemijskog sastava.....	30
Slika 40. Prikaz rezultata određivanja kemijskog sastava	30
Slika 41. Oslonci i trn na preši.....	32
Slika 42. Shematski prikaz sila na preši prilikom lomljenja vratila	33
Slika 43. Slomljeno vratilo	33
Slika 44. Izrezani dijelovi prijelomne površine	34
Slika 45. Prijelomna površina segmenta A prije i poslje rezanja	35
Slika 46. Sustav za fotografiranje	35
Slika 47. Utjecaj osvjetljenja na izgled površine	36
Slika 48. Izrezani komad 1, prednja strana	37
Slika 49. Izrezani komad 1, stražnja strana.....	37
Slika 50. Izrezani komad 2, vanjska strana.....	38
Slika 51. Izrezani komad 2, unutarnja strana.....	38
Slika 52. Stereomikroskop Mantis Elite	39
Slika 53. Korodirana površina pod stereomikroskopom (povećanje 8x).....	40
Slika 54. Korodirani rub izrezanog dijela prijelomne površine (povećanje 8x).....	40
Slika 55. Uzorci za metalografiju	41
Slika 56. Uzorak zaliven polimernom masom.....	42
Slika 57. Uređaj za brušenje Presi Minitex 233.....	43
Slika 58. Uređaj za poliranje.....	44
Slika 59. Polirano stanje površine uzorka.....	44
Slika 60. Nagriženo stanje površine uzorka.....	45

Slika 61. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	46
Slika 62. Izgled mikrostrukture pri različitim povećanjima (50x i 1000x).....	47
Slika 63. Povećanje 50x, pozicija A	48
Slika 64. Povećanje 100x, pozicija A	48
Slika 65. Povećanje 200x, pozicija A	49
Slika 66. Povećanje 500x, pozicija A	49
Slika 67. Povećanje 1000x, pozicija A	50
Slika 68. Povećanje 1000x, pozicija B.....	50
Slika 69. Zwick/Roell ZHV μ tvrdomjer	51
Slika 70. Mjesta mjerenja tvrdoće po cijeloj duljini presjeka.....	52
Slika 71. Analizirani fragment vratila.....	53
Slika 72. Površina fragmenta na SEM-u.....	54
Slika 73. Detalj A prikazan na SEM-u.....	54
Slika 74. Polirano stanje, povećanje 1000x	58
Slika 75. Mirkostruktura, povećanje 1000x.....	59
Slika 76. Primjer mikrostrukture iz literature -42CrMo4 čelična šipka, austenitizirano na 845°C, kaljeno u ulju na 65°C i žareno dva sata pri na 620°C. Struktura je mješavina martenzita, ferita i karbida. Uzorak je nagrižen 2% - tnom otopinom nitala, povećanje 750x[11]	59
Slika 77. Pukotina na odlomljenom fragmentu.....	60
Slika 78. Pukotina na uzorku s prijelomne površine.....	61
Slika 79. Amorfne naslage na površini	61

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Hrapavost površine - segment A, strana pukotine	22
Tablica 2. Hrapavost površine - segment A, suprotna strana	22
Tablica 3. Hrapavost površine - segment B, sektor A	25
Tablica 4. Hrapavost površine - segment B, sektor B.....	25
Tablica 5. Rezultati mjerenja površinske tvrdoće HV10.....	28
Tablica 6. Kemijski sastav očitani na segmentu A	31
Tablica 7. Očitani kemijski sastav na segmentu B	31
Tablica 8. Očitani kemijski sastav na segmentu C	31
Tablica 9. Kemijski sastav određen optičkom emisijskom spektrometrijom	51
Tablica 10. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku, HV1 i HV5.....	52
Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće po presjeku, HV5.....	53
Tablica 12. Usporedba kemijskih sastava.....	56
Tablica 13. Usporedba vrijednosti tvrdoće	56

POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje mjerenog profila
$HV_{1,5,10}$	/	Vickers-ova tvrdoća pri različitim opterećenjima
R_d	N/mm^2	Dinamička izdržljivost
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
σ_{sr}	N/mm^2	Srednja vrijednost naprezanja
σ_g	N/mm^2	Gornja vrijednost naprezanja
σ_d	N/mm^2	Donja vrijednost naprezanja
$d_{v1,2}$	mm	Duljine dijagonala na otisku Vickers indentora
D	mm	Promjer većeg presjeka
d	mm	Promjer manjeg presjeka
r	mm	Radijus zakrivljenosti na mjestu promjene presjeka

SAŽETAK:

U sklopu ovog diplomskog rada provedena je analiza oštećenja pogonskog vratila. U teorijskom dijelu rada detaljno je opisan postupak provođenja analize uzroka oštećenja i lomova strojnih dijelova u eksploataciji. Navedena su zahtjevi i uvjeti za tehničke materijale koji se koriste za izradu pogonskih vratila za generatore velikih snaga. U sklopu eksperimentalnog dijela rada, provedena je temeljita vizualna kontrola cijeloga vratila te fraktografska i metalografska analiza. Na temelju dobivenih rezultata mjerenja i zapažanja tijekom analize donešeni su zaključci o potencijalnom uzroku loma, te predložene adekvatne preventivne mjere.

Ključne riječi: analiza oštećenja, pogonsko vratilo, fraktografija, metalografija

SUMMARY:

As part of this thesis, a drive shaft failure analysis was performed. The theoretical part of the paper describes in detail the procedure for conducting an analysis of the causes of damage and fractures of machine parts in operation. The requirements and conditions for technical materials used for the construction of drive shafts for high power generators are listed. As part of the experimental part of this thesis, a thorough visual inspection, as well as fractographic and metallographic analysis was carried out. Based on the obtained measurement results and observations during the analysis, conclusions were made about the potential cause of fracture and adequate preventive measures.

Key words: fracture analysis, drive shaft, fractography, metallography

1 UVOD

Pogonsko vratilo jedan je od najvažnijih strojnih dijelova, koji služi za prijenos okretnog momenta i snage s pogonskog na pogonjeni uređaj. S obzirom na važnost vratila u cjelokupnoj konstrukciji stroja, izrazito je važno da se koriste odgovarajući tehnički materijali. Nakon izbora odgovarajućeg materijala, kvaliteta izrade i preciznost izvođenja radova tijekom svih koraka i stadija proizvodnog procesa je ključna kako bi se osigurao siguran, pouzdan i zadovoljavajući rad. Tijekom eksploatacije dolazi do pojave različitih vrsta statičkih i dinamičkih opterećenja, što uvjete rada čini izrazito nezahvalnima. Različita opterećenja uzrokuju različita naprezanja u materijalu, koja mogu rezultirati pojavom pukotina i sličnih oštećenja materijala koja degradiraju njegova mehanička svojstva, a samim time i postojanost gotovog komada. Propagacija pukotina i drugih oštećenja po presjeku ili površini vratila može uzrokovati trajne posljedice i u konačnici rezultirati havarijom.

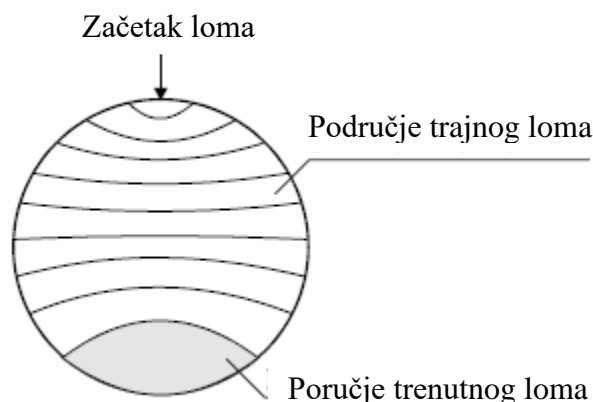
U slučaju nepovratnih oštećenja, uništeni komad (vratilo) potrebno je ukloniti, te provesti detaljnu višestupanjsku analizu. Analiza oštećenja obuhvaća različite korake i postupke koje je potrebno provesti kako bi se s dovoljnom razinom sigurnosti mogao utvrditi uzrok oštećenja, te kako bi se u budućnosti mogli poduzeti svi potrebni koraci i napraviti sve potrebne preinake proizvodnog postupka, da se izbjegnu nezadovoljavajući ishodi. U sklopu analize određuje se kemijski sastav materijala, provodi se više vrsta vizualne inspekcije komada (golim okom, povećalom, fotografiranje, mikroskopom...), analizira se kvaliteta izrade na površini (hrapavost površine, radijusi na urezima i promjenama presjeka), mjeri se tvrdoća materijala na površini. Kada su sva potrebna ispitivanja na površini izvedena i rezultati analizirani, daljnji koraci u analizi podrazumijevaju lomljenje komada i uzorkovanje. Provodi se fraktografska analiza, a na uzorcima („epruvetama“) se ispituju osnovna mehanička svojstva materijala.

Nakon što su svi potrebni koraci u procesu analize oštećenja izvršeni i rezultati mjerenja analizirani, na temelju dobivenih rezultata donose se zaključci o uzroku sa zadovoljavajućom razinom sigurnosti i moguće opcije prevencije sličnih budućih oštećenja.

2 UMOR MATERIJALA

2.1 Općenito o umoru materijala

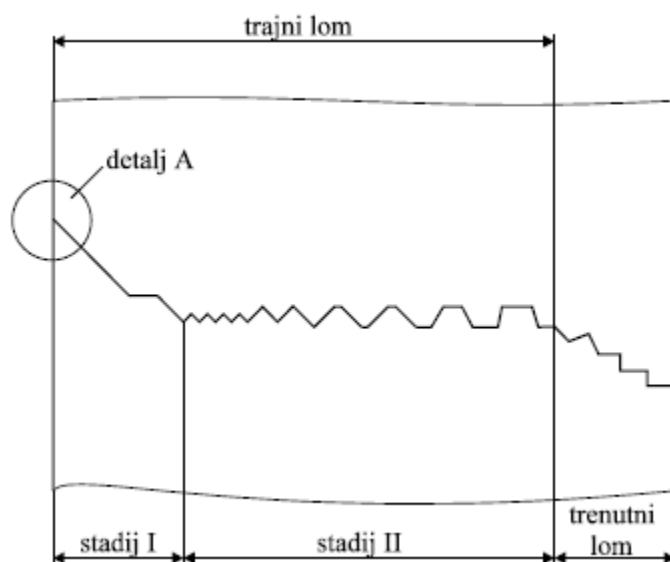
Strojni dijelovi često nisu opterećeni samo statičkim opterećenjima, već i dinamičkim opterećenjima promjenjivog intenziteta. Posljedica dugotrajnih dinamičkih opterećenja je umor materijala. Umor materijala definiran je kao postupno razaranje materijala zbog dugotrajnog djelovanja promjenjivog dinamičkog naprezanja čiji je rezultat prijelom strojnog dijela [1]. Bez obzira što se radi o naprezanjima koja su iznosom manja od granice razvlačenja, zbog dugotrajnog utjecaja i promjena intenziteta naprezanja može doći do loma. Lomna površina uzorkovana umorom materijala vrlo je specifičnog izgleda i vidljiva su različita područja. Shematski prikaz prijelomne površine uzrokovane umorom materijala prikazan je na Slika 1.



Slika 1. Shematski prikaz prijelomne površine uzrokovane umorom materijala [1]

Jedna od glavnih karakteristika loma uzrokovanog umorom materijala je da nema vidljive plastične deformacije, čak i kod žilavih materijala. Prijelomna površina sastoji se od dva jasno različita dijela. Svjetliji zaglađeni dio s brazdama napredovanja pukotine nastajao je duži period vremena i zbog toga se naziva „područje trajnog loma“. Drugi dio je hrapaviji, zrnatije teksture i tamniji, te se naziva „područje trenutnog loma“. „Područje trenutnog loma“ nastaje u trenutku kada naprezanje kojem je strojni dio izložen, zbog smanjenja nosive površine, postaje jednako ili veće od vlačne čvrstoće materijala. Omjer površina trenutnog i trajnog loma, i njihov razmještaj ovisi o intenzitetu i vrsti dinamičkog naprezanja i o intenzitetu koncentracije naprezanja [1]. Kod idealno glatkih izradaka ili epruveta bez ikakvih vrsta koncentrata naprezanja, inicijalna klica loma posljedica je lokalne deformacije (nehomogenosti). Mjesta nehomogenosti predstavljaju

svojevrzne koncentratore naprezanja i potencijalna mjesta nastanka inicijalne pukotine. U idealnom teoretskom slučaju pukotina se širi pod kutem od $\approx 45^\circ$ u odnosu na normalno naprezanje tj. paralelno sa smjerom maksimalnom smičnog naprezanja. Takav model širenja prisutan je samo kroz nekoliko kristalnih zrna i brzina širenja pukotine ovisi o okolnom mediju. Ukoliko su prisutni koncentratori naprezanja ili je amplituda naprezanja velika, nema pojave idealnog prvog stadija širenja pukotine. Tijekom drugog stadija (područje trajnog loma) pukotina se širi transkristalno, i u tom stadiju nastaju karakteristične brazde prijelomne površine. Povećanje razmaka između brazdi ukazuje na povećanje brzine širenja pukotine, zbog kontinuiranog smanjenja nosive površine i analogno tome povećanja naprezanja. Kao što je rečeno, u trenutku kada zbog smanjenja nosive površine naprezanje dosegne i premaši vlačnu čvrstoću nastupa trenutni lom tj. treći stadij širenja pukotine. Slika 2. shematski prikazuje proces propagacije pukotine do konačnog loma uzrokovane umorom materijala [1].

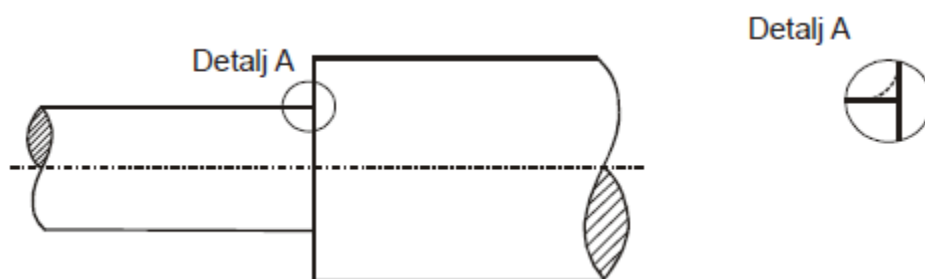


Slika 2. Shematski prikaz propagacije pukotine do loma [1]

U stvarnim slučajevima, postojanje koncentrata naprezanja gotovo je nemoguće izbjeći i zbog toga je potrebno poduzeti sve potrebne korake, kako bi se njihov utjecaj što više smanjio. Koncentratori naprezanja se prema podrijetlu dijele na tri vrste:

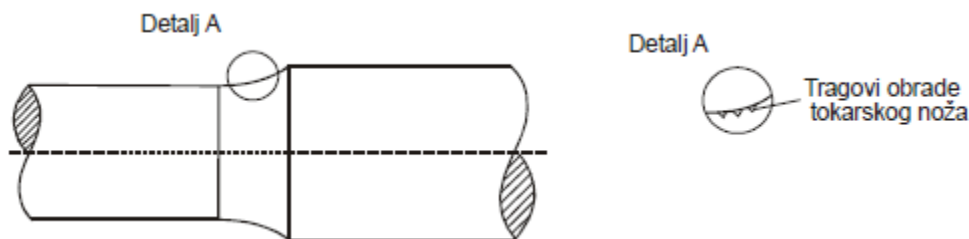
1. Konstrukcijskog podrijetla,
2. Tehnološkog podrijetla,
3. Eksploatacijskog podrijetla.

Konstruktivski koncentratore napreznja su najčešće mjesta s nedovoljno velikim radijusom zaobljenosti, što je najčešće nalazi na vratilima i osovinama s promjenjivim presjekom. Konstruktivski koncentratore su i navoji vijaka, utori za klin i slična mjesta na konstruktivskim dijelovima. Ilustrativni primjer konstruktivskog koncentratore napreznja u vidu nedovoljno velikog radijusa na mjestu promjene veličine presjeka prikazan je na Slika 3. [1].



Slika 3. Konstruktivski koncentratore napreznja [1]

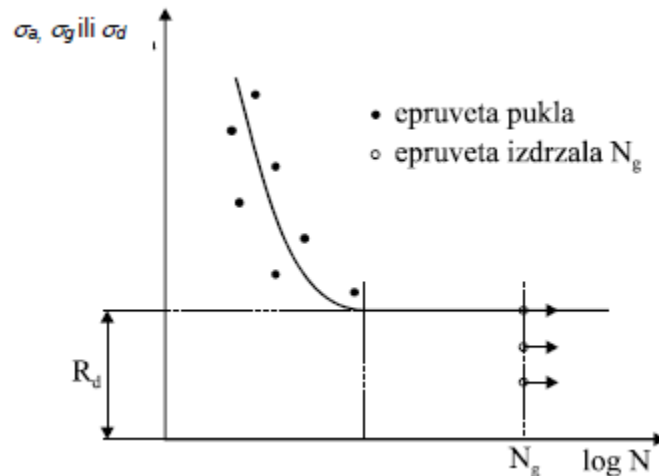
Tehnološki koncentratore najčešće nastaju već u postupku izrade komada. Kod lijevanja postoji mogućnost pojave pora i različitih uključaka itd. Kod toplog oblikovanja može doći do pojave pukotina koje su posljedice različitih izlučevina, a zbog loše provedenog postupak toplinske obrade mogu se pojaviti pukotine. Također loše provedena obrada odvajanjem čestica može rezultirati nastankom utora (Slika 4.) [1].



Slika 4. Tehnološki koncentratore napreznja [1]

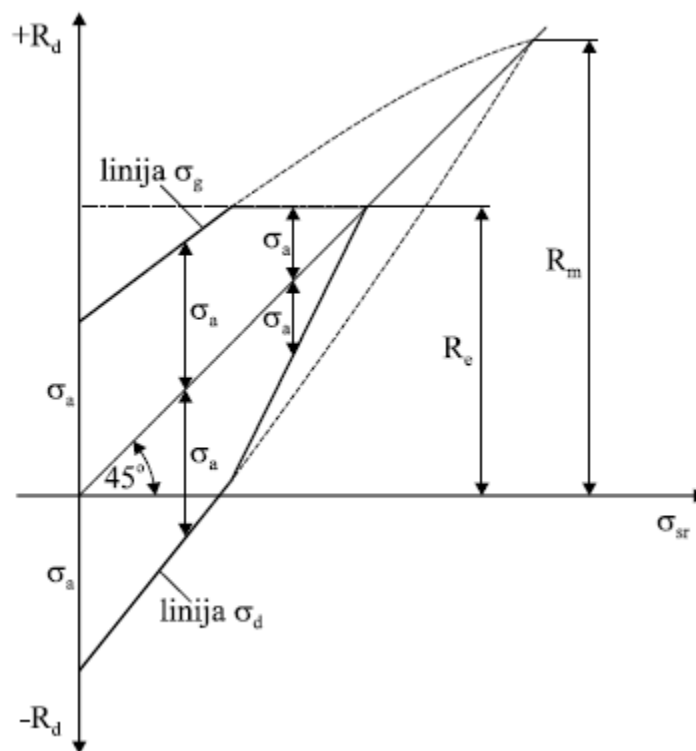
Eksploatacijski koncentratore napreznja su posljedice neadekvatnog rukovanja, transporta, procesa montaže i demontaže, ili održavanja što može rezultirati pojavom napetosne korozije ili npr. vodikove bolesti [1].

Otpornost tehničkog materijala prema umoru materijala opisuje se mehaničkim svojstvom koje se naziva *dinamička izdržljivost*. Dinamička izdržljivost se ispituje s ciljem određivanja ponašanja tehničkih materijala i strojnih dijelova u prisustvu dinamičkih naprezanja. Dinamička naprezanja, jednako kao i statična, mogu biti vlačna, tlačna, savojna i torzijska tj. naprezanje uvijanja. Za prikazivanje rezultata ispitivanja dinamičke izdržljivosti koriste se Wöhler-ov i Smith-ov dijagram, prikazani na Slika 5. i Slika 6. Wöhler-ov dijagram prikazuje rezultate Wöhler-ovog pokusa. Pokus se sastoji od ispitivanja šest do deset epruveta (oblik ispitne epruvete ovisi o vrsti ispitivanog opterećenja) u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja na uređajima koji se zovu pulsatori. Rezultati pokusa unose se u dijagram, u koji su uneseni podaci o izdržanom broju ciklusa do loma epruvete, za određene vrijednosti dinamičkog naprezanja. Najveći broj ciklusa koji epruveta izdrži bez makropukotina ili loma naziva se *dinamička izdržljivost* – R_d [N/mm²] [1].



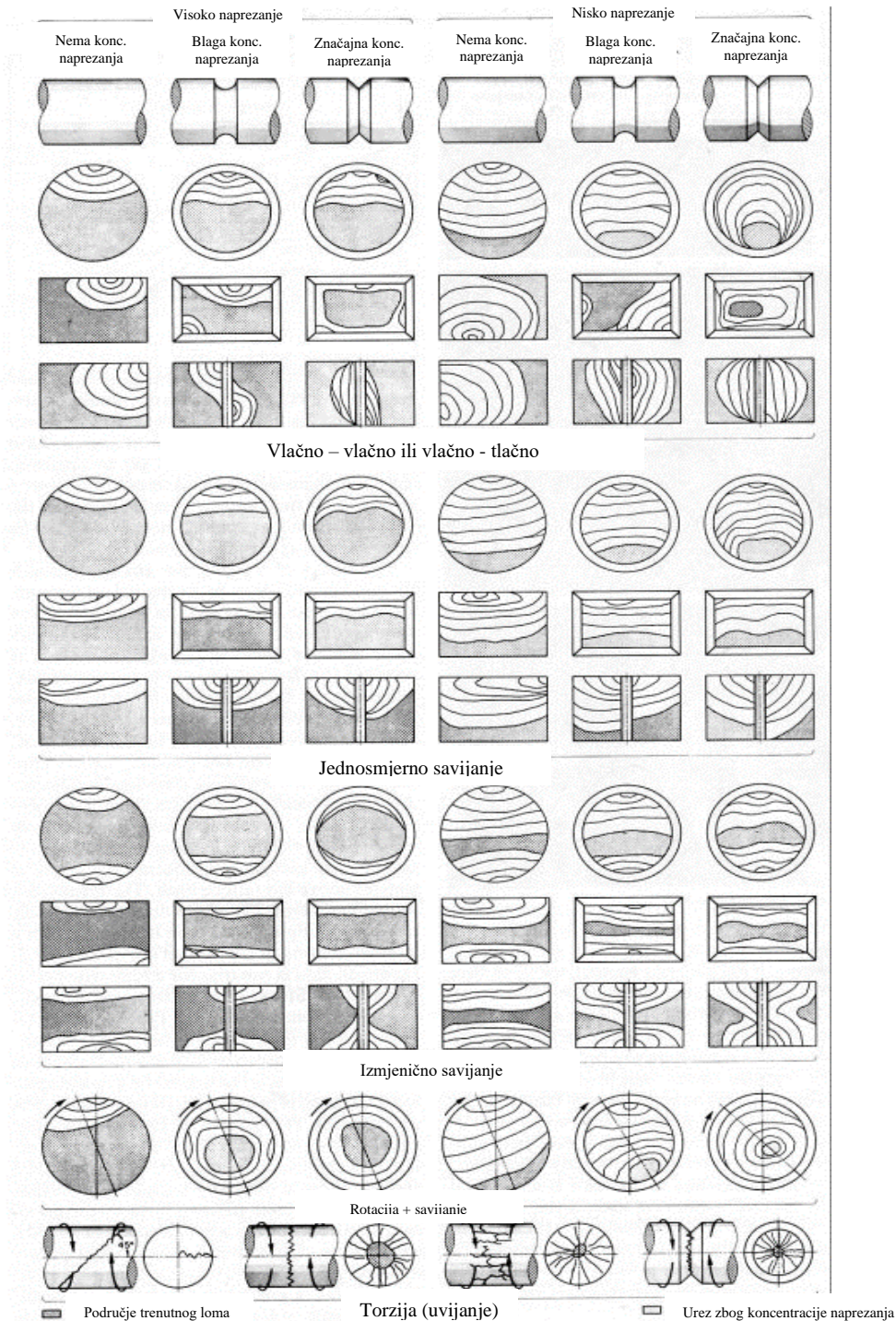
Slika 5. Wöhler -ov dijagram [1]

Smith-ov dijagram prikazuje ovisnost dinamičke izdržljivosti R_d o srednjem naprezanju σ_{sr} . Gornja strana područja dinamičke izdržljivosti ograničena je granicom razvlačenja R_e i linijom gornjih naprezanja σ_g . Donja strana je ograničena linijom donjih naprezanja σ_d . Na taj način se iz Smith-ovog dijagrama dobiva veličina dozvoljene amplitude, sukladno iznosu srednjeg naprezanja. Što je srednje naprezanje veće, dozvoljena amplituda je manja. U graničnom slučaju ako je srednje naprezanje jednako granici razvlačenja, dozvoljena amplituda je nula [1].



Slika 6. Smith-ov dijagram [1]

Kod lomova uzrokovanih umorom materijala, izgled prijelomne površine ovisi o vrsti napreznja i prisutstvu/značaju koncentrata napreznja. Slika 7. shematski prikazuje razlike u izgledu prijelomnih površina, ovisno o vrsti napreznja i utjecaju koncentrata napreznja.



Slika 7. Izgled prijelomne površine ovisno o vrsti napreznja [2]

2.2 Umor materijala uzrokovan torzijskim naprežanjem (uvijanje)

Kao što je ranije navedeno, dinamička opterećenja mogu biti vlačna, tlačna, savojna, i torzijska, odnosno naprežanja uslijed uvijanja. Vrsta naprežanja kojem se stroj izložen, utječe na izgled i određene karakteristike prijelomne površine. Osim ranije navedenih, jasno prepoznatljivih, područja trajnog i trenutnog loma na prijelomnoj površini pojavljuju se još neke važne značajke prijelome površine koje mogu pružiti korisne informacije u uzroku oštećenja i loma. To su tzv. „nazubljene linije“ (eng. *ratchet marks*) i tzv. „riječne linije“ (eng. *river marks*), te kut loma strojnog dijela.

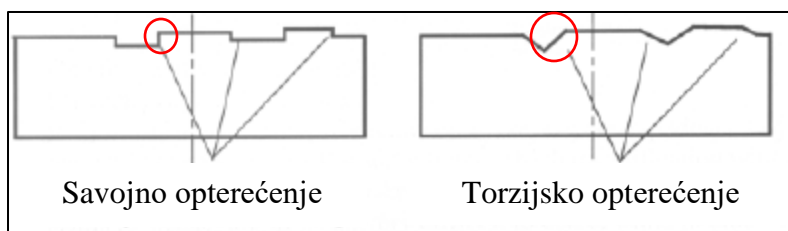
1. Nazubljene linije (eng. *ratchet marks*)

Nazubljene linije ovisno o položaju mogu značiti više stvari. Položaj linije, smjer širenja, i broj linija govori o vrsti opterećenja i naprežanja, prisutnosti koncentratora naprežanja, čak i o broju izvora pukotine. Nastaju u prisustvu visokog naprežanja ili manjeg naprežanja u kombinaciji s koncentratorima naprežanja. Slika 8. shematski prikazuje pojavu nazubljene linije između dva izvora pukotine.



Slika 8. Nazubljena linija između dva izvora pukotine [3]

Kut nazubljenih linija u odnosu lomnu površinu, ukazuje na vrstu opterećenja kojem je strojni dio bio izložen. Kada bi se prijelomna površina okomito prerezala, nazubljene linije imaju različite oblike. Kod savojnog opterećenja nazubljene linije su gotovo okomite na plohu presjeka, dok su u slučajevima primarno torzijskog opterećenja nakošene. Ilustracija različitih presjeka nazubljenih linija ilustrativno je prikazana na Slika 9. [3].

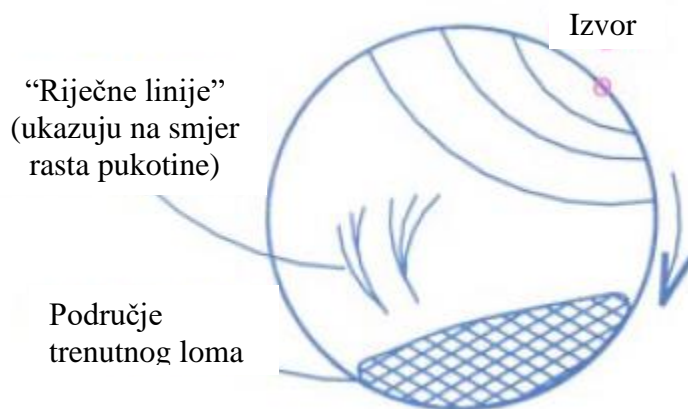


Slika 9. Oblik presjeka nazubljenih linija ovisno o opterećenju [3]

Kombinacija većeg broja nazubljenih linija i malog područja trenutnog loma ukazuje na to da je opterećenje bilo manje, ali je bila značajna prisutnost koncentrata naprežanja [3].

2. Riječne linije (eng. „river marks“)

„Riječne linije“ dobile su svoj naziv prema tome što izgledom i nepravilnim oblikom podsjećaju na rijeke na geografskoj karti. „Riječne linije“ prikazuju smjer propagacije pukotine uzrokovane umorom materijala. Slika 10. prikazuje skicu pojave riječnih linija na presjeku uništenog vratila pumpe [3].



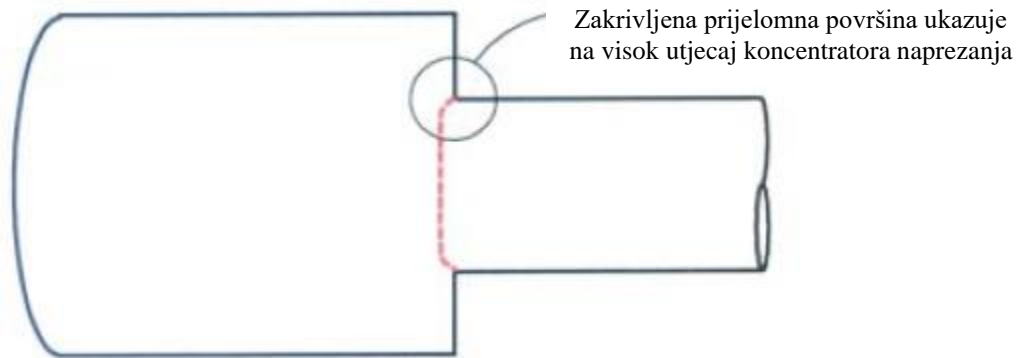
Slika 10. „Riječne linije“ na skici presjeka [3]

„Riječne linije“ najčešće se pojavljuju u području brzog rasta pukotine, i osim što pokazuju smjer širenja tj. rasta pukotine, ne pružaju druge informacije o uzroku loma [3].

3. Oblik prijelomne površine

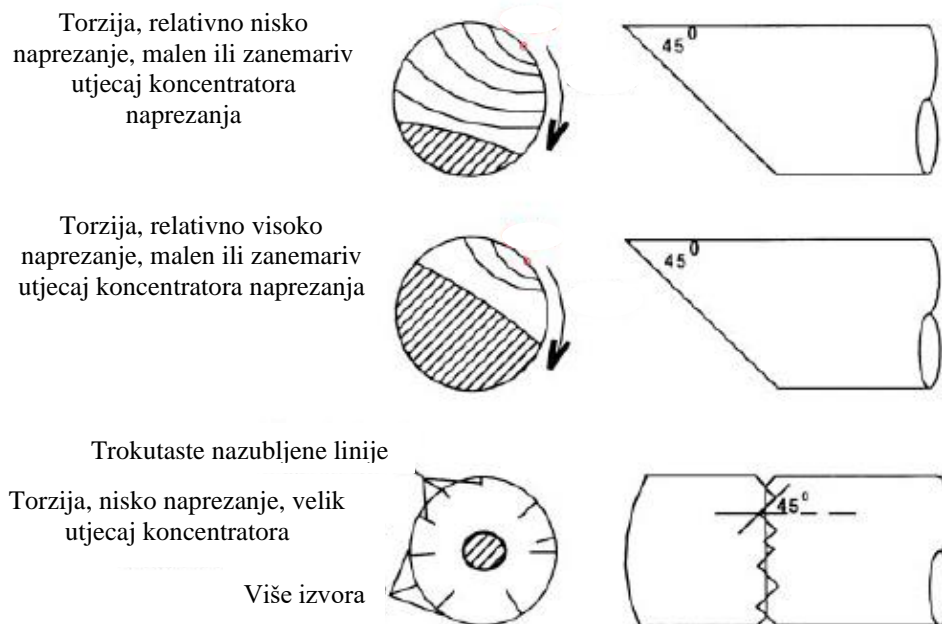
Oblik prijelomne površine iz bočnog pogleda na vratilo govori nam o tome postoji li značajan utjecaj koncentrata naprežanja, primarno konstrukcijskog podrijetla (npr. nedovoljno velik radiju na mjestu promjene presjeka). Ukoliko je utjecaj koncentrata naprežanja malen, ili u

potpunosti zanemariv, prijelomna površina gledana iz bočnog pogleda u pravilu bi trebala biti ravna ploha. Ali ako je utjecaj koncentratora naprezanja značajan, prijelomna površina će imati konveksan, odnosno zakrivljen oblik. Slika 11. prikazuje utjecaj prisutnosti koncentratora naprezanja na opći oblik prijelomne površine [3].



Slika 11. Utjecaj koncentratora naprezanja na oblik prijelomne površine [3]

Prilikom torzijskog opterećenja i naprezanja odnosno loma uslijed istog, strojni komad puca pri $\approx 45^\circ$. Na Slika 12. je shematski prikaz kuta pucanja strojnog komada i izgled prijelomne površine ovisno o visini naprezanja i veličini utjecaja koncentratora naprezanja.



Slika 12. Prijelomne površine pri torzijskom naprezanju [3]

3 PROCEDURA ANALIZE KVAROVA I OŠTEĆENJA

Postupak provođenja analize oštećenja jasno je definiran te svaki od koraka sadrži različite korake koje je potrebno provesti. Koraci i postupci koje je potrebno provesti, osmišljeni su za različite dijelove, od sitnih strojnih dijelova do masivnih konstrukcija. Različiti postupci koji se provode u fazama analize ovise o tome kakav dio se analizira, te koje od metoda ispitivanja su primjenjive. Primarni ograničavajući faktor je svakako dimenzija analiziranog dijela, zbog čega je ponekad potrebna dodatna obrada komada kako bi se mogla provesti potrebna ispitivanja. Prilikom određivanja uzroka oštećenja pogonskog vratila za generator velike snage, potrebno je rezanje vratila na manje komade kako bi se mogla izvršiti sva potrebna ispitivanja.

Procedura analize kvarova i oštećenja sastoji se od sljedećih točaka [4]:

1. Sakupljanje osnovnih podataka o kvaru – opis kvara:
 - Dostupni podaci o proizvodnom procesu analiziranog dijela ili konstrukcije,
 - Povijest rada,
 - Fotografiranje ili skiciranje,
 - Izbor uzoraka.
2. Preliminarno ispitivanje dijelova:
 - Vizualni pregled golim okom,
 - Fotografiranje ili skiciranje
3. Nerazorna ispitivanja:
 - Izbor prikladnih metoda.
4. Izbor, čuvanje i čišćenje prijelomnih površina:
 - Ne dirati prstima,
 - Ne prislanjati slomljene dijelove jedne na druge,
 - Ne prati vodom,
 - Zaštititi uzorke od kemijskih, toplinskih i mehaničkih oštećenja,
 - Kod rezanja uvijek fotografirati ili skicirati mjesta rezanja,
 - Otvaranje sekundarnih pukotina.

5. Makroskopsko ispitivanje:

- Golo oko,
- Lupa,
- Fotografski aparat,
- Stereomikroskop,
- SEM malog povećanja.

6. Mikroskopsko ispitivanje:

- Svjetlosni mikroskop,
- Replika,
- TEM,
- SEM.

7. Izbor metalografskih uzoraka:

- Cilj je analizirati mikrostrukturu u blizini inicijalnih pukotina, osobito kod umora materijala.

8. Analiza metalografskih uzoraka:

- Vrsta materijala,
- Mikrostruktura,
- Pukotina,
- Problemi toplinske obrade.

9. Mehanička ispitivanja:

- Tvrdća,
- Vlačno naprezanje,
- Smično naprezanje,
- Žilavost,
- Lomna žilavost.

10. Utvrđivanje tipa loma:

- Krhki lom,
- Duktilni lom,
- Lom od umora,
- Lom od interkristalne korozije,
- Lom od napetosne korozije.

11. Kemijska analiza:

- Provjera je li materijal onaj koji je deklariran.

12. Primjena mehanike loma:

- Utvrđivanje uzroka loma,
- Korektivne mjere za izbjegavanje sličnih lomova.

13. Simulacijsko ispitivanje u uvjetima sličnim eksploatacijskim:

- Avioni i automobili u zračnim tunelima,
- Brodovi u bazenima.

14. Analiza dokaza, formuliranje zaključaka i pisanje izvještaja:

- Ponekad nije moguće jasno utvrditi isključivi uzrok kvara, nego samo pretpostavljeni, s manjom ili većom vjerojatnošću.

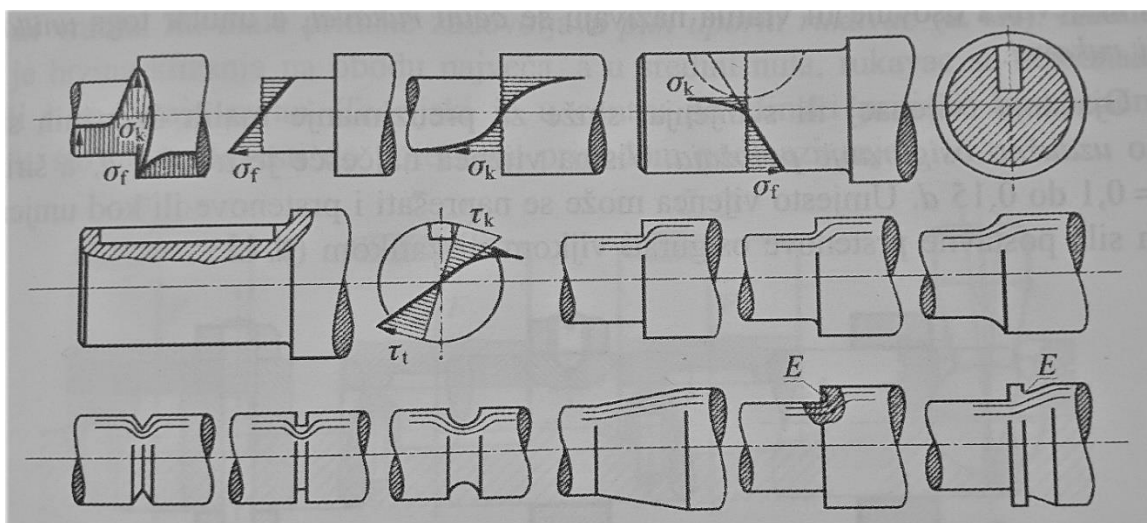
4 POGONSKA VRATILA GENERATORA VELIKIH SNAGA

Vratila na sebi nose strojne dijelove kao i osovine, ali se ovi dijelovi rotiraju te uvijek prenose okretni moment. Za razliku od osovina, koje se ne rotiraju i opterećene se samo na savijanje, vratila su opterećena na savijanje i uvijanje [5].

Za izradu vratila i osovina općenito se koristi čelik E335, a za visokonapregnuta čelik E360. Kod većih zahtjeva može se koristiti i C35, 40Mn4, 34Cr4, 41Cr4 i slični čelici za poboljšavanje. Korištenje legiranih čelika isplativo je ako tijekom eksploatacije dolazi do titrajnih naprezanja tj. izmjeničnog savijanja, samo u slučaju kada ne postoji djelovanje zarezova. Čelici visokih mehaničkih svojstava vrlo su osjetljivi na takva djelovanja [5].

Ravna vratila do promjera 150 mm obično se izrađuju iz okruglih komada čelika tokarenjem, ljuštenjem ili hladnim valjanjem. Deblja vratila i vratila s više promjera najčešće se izrađuju kovanjem, i skidanjem čestica. Prijelazi između promjera se fino bruse, tokare i poliraju prema zahtjevima [5].

Izmjenična savojna naprezanja pri svim promjenama presjeka i utorima izazivaju stalnu opasnost od loma zbog umora materijala uz djelovanje zarezova. Određeni dio vršnih naprezanja može se smanjiti prikladnim mjerama tijekom oblikovanja, u vidu eliminiranja djelovanja zarezova, i adekvatne površinske obrade [5]. Na Slika 13. prikazana je ilustracija djelovanja zarezova i tok sila na osovinama i vratilima.



Slika 13. Djelovanje zarezova i tok sila u vratilima [5]

5 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U sklopu analize oštećenja vratila, i procesu analize provedena su različita mjerenja i ispitivanja. Naredna potpoglavlja opisuju su korake u procesu analize i navedeni su korišteni alati i mjerni uređaji. Navedeni su rezultati mjerenja te je u idućem poglavlju provedena analiza istih.

5.1 Plan ispitivanja

Plan provođenja ispitivanja sastoji se od više koraka i vrsta provedenih ispitivanja. Provedena je vizualna kontrola, nerazorne mjerenja, te razorna mjerenja i ispitivanja.

1. Vizualna kontrola – vizualna inspekcija golim okom, fotografiranje cijeloga vratila, pregledavanje ureza pod povećalom, makrofotografiranje i stereomikroskopija;
2. Nerazorna ispitivanja – površinsko mjerenje hrapavosti, površinsko mjerenje tvrdoće, površinsko određivanje kemijskog sastava, metalografija, određivanje kemijskog sastava optičkom emisijskom spektrografijom;
3. Razorna ispitivanja i mjerenja – lomljenje vratila na preši, izrezivanje dijelova prijelomne površine, izrezivanje uzoraka za metalografiju, izrezivanje uzoraka za analizu na SEM-u.

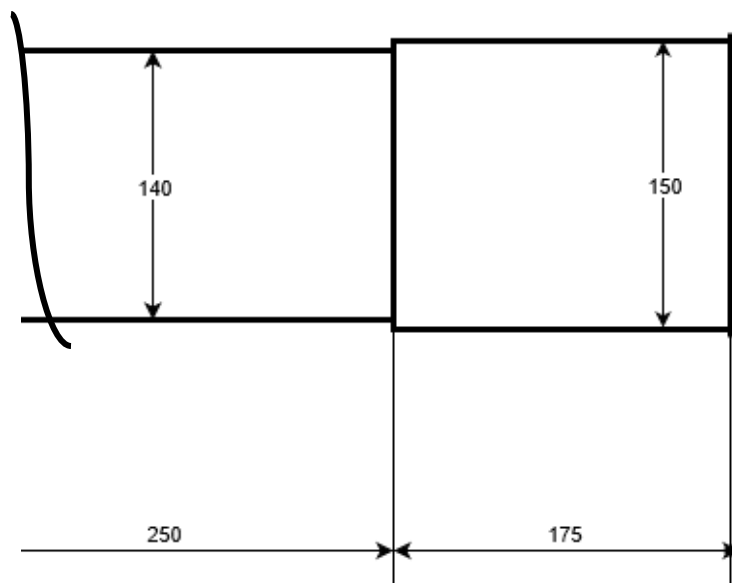
Kroz sljedeća potpoglavlja opisani su pojedini koraci analize po redu kako su se provodili.

5.2 Vizualna kontrola

Prvi korak u analizi oštećenja je detaljna vizualna kontrola analiziranog komada. Vratilo je detaljno fotografirano digitalnim fotoaparatom visoke razlučivosti, dok su „interesna mjesta“ (mjesto pukotine, prostor širenja pukotine, površinska oštećenja uzrokovana eksploatacijom...) posebno naglašena i zasebno fotografirana.

5.2.1 Analiza golim okom i fotografiranje cijelog vratila

Početak analize sastojao se od mjerenja vratila kako bi se utvrdili vanjski gabariti i mjere cijeloga komada, te kako bi se vratilo moglo skicirati i 3D modelirati pomoću proizvoljnog programskog paketa, radi lakšeg ilustriranja. Slika 14. prikazuje vanjske dimenzije vratila na ilustrativnom tehničkom crtežu.

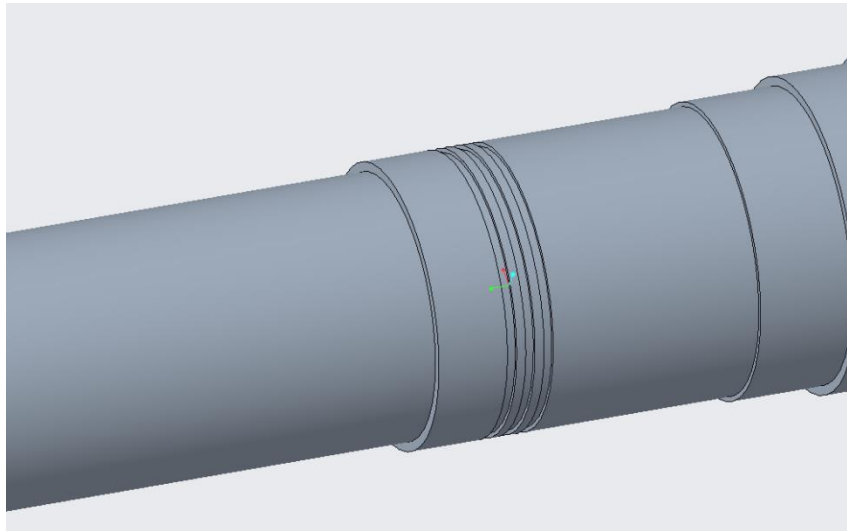


Slika 14. Tehnički crtež vratila – ilustracija

Na Slika 15. prikazano je vratilo na kojem se provodi analiza oštećenja, a Slika 16. prikazuje ilustrativni 3D model vratila.

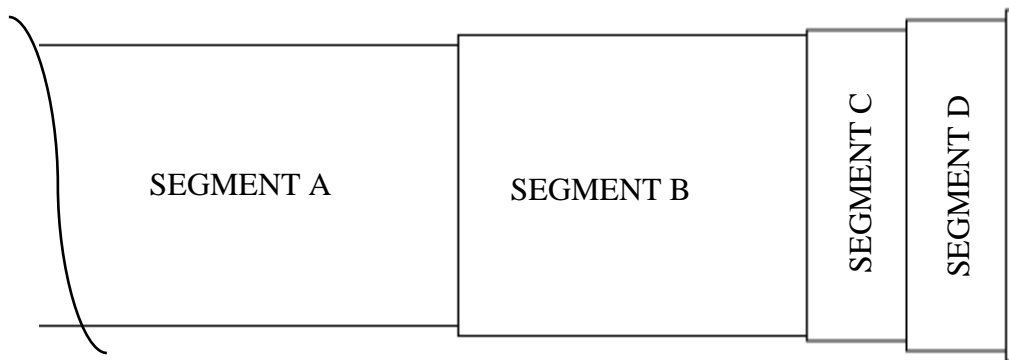


Slika 15. Oštećeno pogonsko vratilo



Slika 16. Ilustrativni 3D model pogonskog vratila

Radi jednostavnijeg snalaženja i jasnijeg označavanja dijelova, i mjesta gdje su pojedina mjerenja izvršena, dijelovi vratila zabilježeni su kao „segmenti“. Slika 17. prikazuje segmente vratila na ilustrativnom tehničkom crtežu.



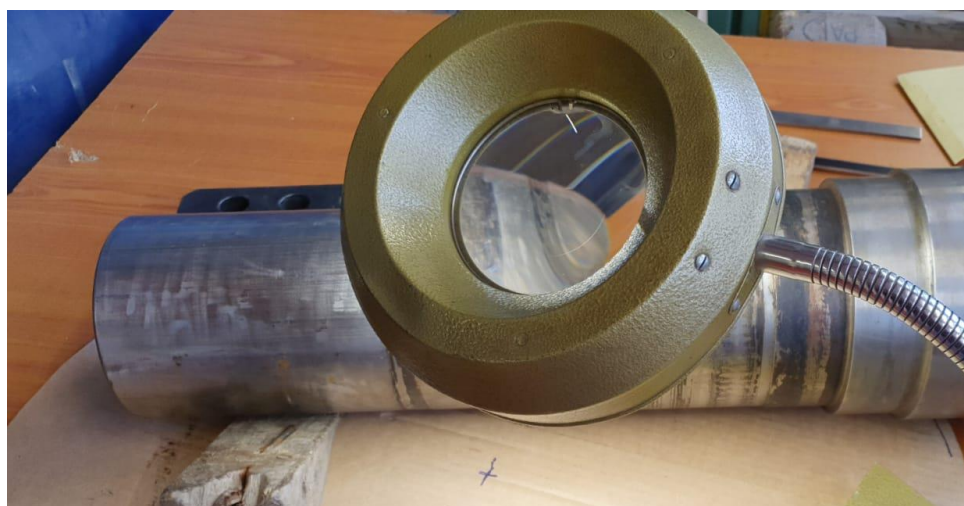
Slika 17. "Segmenti" vratila

5.2.2 Analiza ureza povećalom

Na segmentu B nalaze se tri ureza po cijelom opsegu vratila. U sklopu analize površine urezi su promatrani pod povećalom kako bi se utvrdilo jesu li prisutne makroskopske nepravilnosti. Slika 18. prikazuje ureze, a Slika 19. ispitivanje pod osvjetljenim povećalom.



Slika 18. Urezi po opsegu vratila



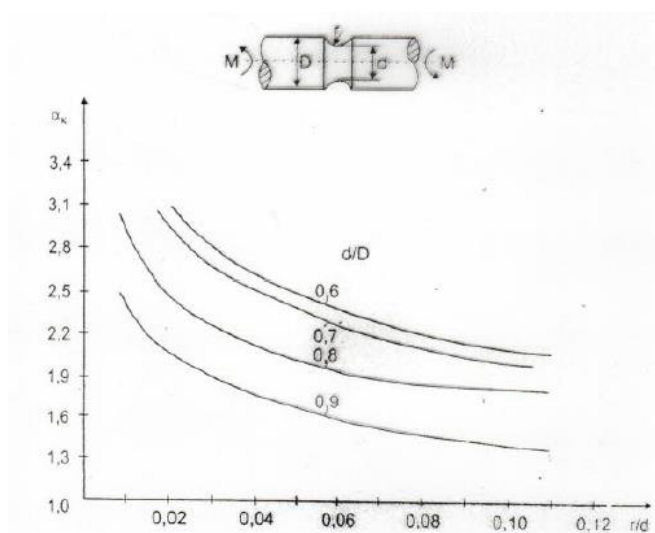
Slika 19. Vizualna kontrola ureza pomoću osvijetljenog povećala

Također su korišteni mjerni listići s mjernim područjem od 1mm do 7mm (Slika 20.), no radijus zakrivljenosti je bio pre malen da bi se očitao, te se smatra da nema značajnog radijusa zakrivljenosti



Slika 20. Mjerni listići za određivanje radijusa

Dovoljno veliki radijusi zakrivljenosti na mjestima promjene presjeka vrlo su važni zbog toga što ako je radijus na mjestu promjene presjeka pre malen to mjesto postaje konstrukcijski koncentrador naprezanja. Na temelju dva omjera, d/D i r/d , pri čemu je d – manji promjer, D – veći promjer i r radijus zakrivljenosti na mjestu prelaska s jednog na drugi promjer. Slika 21. prikazuje graf pomoću kojeg se određuje koeficijent utjecaja na naprezanje [6].



Slika 21. Određivanje koeficijenta koncentracije naprezanja [6]

5.3 Mjerenje hrapavosti površine R_a

Nakon vizualne kontrole vanjske površine, fotografiranja vratila i „interesnih mjesta“, te pregleda ureza pod povećalo i mjerenja radijusa, provedena su mjerenja hrapavosti površine. Korišten je prijenosni mjerač hrapavosti površine Taylor Hobson Surtronic DUO prikazan na Slika 22.



Slika 22. Prijenosni mjerač hrapavosti Taylor Hobson Surtronic DUO

Parametar hrapavosti koji je mjereno je R_a , taj parametar je definiran kao srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila [6]. Mjerna jedinica su mikrometri (μm). Hrapavost površine mjerena je na četiri mjesta na segmentu A (svako mjesto po pet mjerenja), i četiri mjesta na segmentu B (svako mjesto po deset mjerenja). Na svim slikama koje prikazuju mjesta mjerenja, vidljiv je bijeli marker, te su sva mjerenja napravljena s desne strane markera.

5.3.1 Mjerenje hrapavosti – segment A

Na segmentu A napravljeno je po pet mjerenja hrapavosti na dva mjesta sa svake strane vratila (na strani vratila gdje se nalazila pukotina, i na suprotnoj strani presjeka). Vrijednosti dobivene mjerenjem na čistom dijelu površine uzete su kao referenca, a vrijednosti na dijelu koji je više oštećen tijekom eksploatacije i koji je hrapaviji su korištene kako bi se pokazao utjecaj

eksploatacije na hrapavost površine. Slike 23., do 26. prikazuju mjesta mjerenja hrapavosti površine na segmentu A.



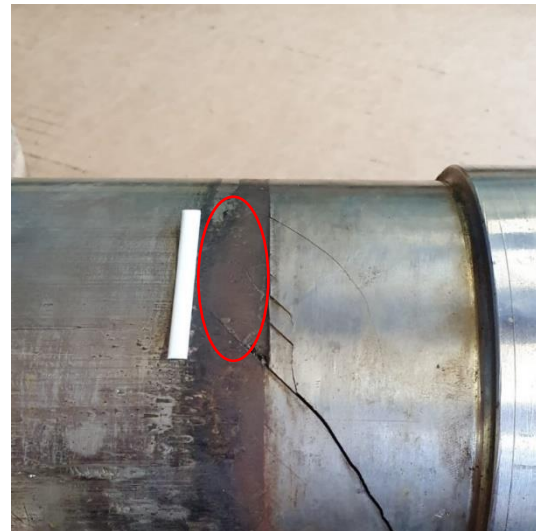
Slika 23. Segment A, referentna površina, pukotina s gornje strane



Slika 24. Segment A, hrapava površina, pukotina s gornje strane



Slika 25. Segment A, referentna površina, pukotina s donje strane



Slika 26. Segment A, hrapava površina, pukotina s donje strane

U Tablica 1. prikazane su vrijednosti izmjerene hrapavosti površine R_a izražene u mikrometrima [μm] na strani pukotine.

Tablica 1. Hrapavost površine - segment A, strana pukotine

SEGMENT A (STRANA PUKOTINE)	Referenta površina, R_a [μm]	Hrapava površina, R_a [μm]
1)	0,39	2,36
2)	0,42	2,05
3)	0,40	1,33
4)	0,35	2,20
5)	0,38	1,32
Prosjek, R_a [μm]	0,39	1,85

U Tablica 2. su prikazane vrijednosti izmjerene hrapavosti površine R_a na suprotnoj strani presjeka.

Tablica 2. Hrapavost površine - segment A, suprotna strana

SEGMENT A (SUPROTNA STRANA)	Referenta površina, R_a [μm]	Hrapava površina, R_a [μm]
1)	0,38	2,38
2)	0,56	2,57
3)	0,35	3,50
4)	0,59	2,47
5)	0,59	2,54
Prosjek, R_a [μm]	0,49	2,69

5.3.2 Mjerenje hrapavosti – segment B

Na segmentu B također su provedena četiri seta mjerenja hrapavosti površine, no zbog relativno jednolikog stanja površine po opsegu vratila, mjerenja su provedena na dva sektora segmenta B. Sektor A nalazi se s lijeve strane ureza i napravljeno je po deset mjerenja na referentnoj (čistoj površini) i deset na oštećenom dijelu površine. Sektor B nalazi se s desne strane ureza, te je također napravljeno po deset mjerenja na referentnom i oštećenom dijelu površine. Slika 27. prikazuje sektore A i B na segmentu B, a slike 28. do 31. prikazuju mjesta na kojima su provedena mjerenja hrapavosti.



Slika 27. Sektori segmenta B, sektor A - žuto, sektor B – crveno



Slika 28. Segment B, sektor A, referentna površina



Slika 29. Segment B, sektor A, blago oštećena površina



Slika 30. Segment B, sektor B, referentna površina



Slika 31. Segment B, sektor B, blago oštećena površina

Rezultati provedenih mjerenja hrapavosti površine na segmentu B prikazani su u tablicama Tablica 3. i Tablica 4.

Tablica 3. Hrapavost površine - segment B, sektor A

SEGMENT B - SEKTOR A	Referenta površina, Ra [μm]	Hrapava površina, Ra [μm]
1)	3,16	3,22
2)	3,28	2,56
3)	3,24	2,58
4)	3,28	2,76
5)	3,27	2,59
6)	2,71	2,51
7)	2,72	2,51
8)	2,58	2,57
9)	2,70	2,50
10)	2,56	2,51
Prosjek, Ra [μm]	2,95	2,63

Tablica 4. Hrapavost površine - segment B, sektor B

SEGMENT B - SEKTOR B	Referenta površina, Ra [μm]	Hrapava površina, Ra [μm]
1)	0,59	2,46
2)	0,59	2,46
3)	0,57	2,47
4)	0,59	2,51
5)	0,50	2,53
6)	0,41	2,49
7)	0,40	2,55
8)	0,46	2,58
9)	0,45	3,03
10)	0,42	3,22
Prosjek, Ra [μm]	0,50	2,63

5.4 Površinsko mjerenje tvrdoće HV10

Nakon vizualne kontrole i ispitivanja hrapavosti površine, provedeno je mjerenje tvrdoće materijala. Za određivanje površinske tvrdoće materijala korištena je Vickersova metoda. Glavna karakteristika Vickersove metode je oblik indentora , a analogno tome i otiska na uzorku. Oblik indentora je četverostrana piramida, s vršnim kutem od 136° između nasuprotnih stranica. Na

ispitnom uzroku ostaje otisak oblika negativne piramide, pravokutnog oblika s karakterističnim dijagonalama d_{v1} i d_{v2} . Kut od 136° odabran je prema tome što taj kut zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovoj kuglici (indentor za mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom) za optimalnu veličinu otiska. Vickersova tvrdoća se prema definiciji izračunava pomoću izraza:

$$HV = \text{Konstanta} * \frac{\text{Ispitna sila}}{\text{Površina otiska}} \quad (1)$$

pri čemu je konstanta recipročna vrijednost ubrzanja sile teže. Analogno tome Vickersova tvrdoća se izračunava kao:

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

gdje je F [N] – sila utiskivanja, S [mm²] – površina otiska nakon rasterećenja. Za mjerenje tvrdoće korištena je ispitna sila od ≈ 100 N koja odgovara ispitivanju HV10. Definirana sila opterećenja za HV10 mjerenja iznosi 98,07 N. Za mjerenja je korišten prijenosni tvrdomjer proizvođača Krautkramer prikazan na slici 32.

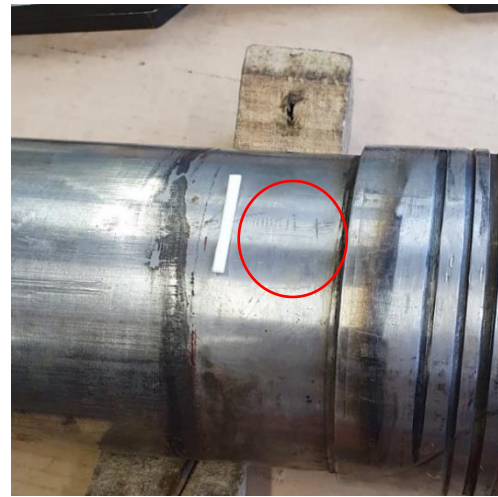


Slika 32. Prijenosni tvrdomjer Krautkramer

Napravljeno je deset mjerenja na pet mjesta na vratilu. Dva na segmentu A, na početku (referentna površina) i prema prijelazu na segment B (blago oštećena površina), na segmentu B u blizini mjesta pukotine, te segmentima C i D na mjestima gdje je površina bila najčišća. Vrijednosti svih deset mjerenja su uprosječene, kako bi se postigla što veća točnost. Mjesta na kojima su provedena mjerenja prikazana su na slikama 33. do 37.



Slika 33. Mjerenje tvrdoće HV10, segment A, referentna površina



Slika 34. Mjerenje tvrdoće HV10, segment A, blago oštećena površina



Slika 35. Mjerenje tvrdoće HV10, segment B, blizina pukotine



Slika 36. Mjerenje tvrdoće HV10, segment C



Slika 37. Mjerenje tvrdoće HV10, segment D

Rezultati mjerenja površinske tvrdoće i prosječne vrijednosti po segmentima prikazani su u Tablica 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja površinske tvrdoće HV10

MJERENJE	SEGMENT A		SEGMENT B, HV10	SEGMENT C, HV10	SEGMENT D, HV10
	Referentna površina, HV10	Blago oštećena površina, HV10			
1)	248	236	231	286	257
2)	259	246	271	248	283
3)	272	239	269	269	256
4)	230	244	280	249	254
5)	281	271	257	293	284
6)	240	269	250	243	263
7)	253	236	256	261	268
8)	248	251	296	258	264
9)	236	247	262	281	297
10)	233	236	288	296	278
PROSJEK, HV10	250,0	247,5	266,0	268,4	270,4
PROSJEK - površina	260,5				

5.5 Površinsko određivanje kemijskog sastava

U sklopu analize potrebno je odrediti kemijski sastav ispitivanog komada, kako bi se rezultati provedenih ispitivanja mogli usporediti s tabelarnim podacima, i definiranim vrijednostima mehaničkih svojstava za materijal od kojeg je ispitivani komad izrađen. Određivanje kemijskog sastava vratila provedeno je pomoću prijenosnog XRF analizatora proizvođača Olympus, koji je prikazan na slici 38.



Slika 38. Olympus XRF analizator

Korišteni uređaj ima širok spektar mogućih primjena, u različitim tehničkim područjima. Za raspoznavanje kemijskog sastava, odnosno različitih kemijskih elemenata u leguri, koristi se princip rendgenske fluorescencije tj. XRF „X-Ray Fluorescence“. Analizator sadrži bazu podataka koju je odabrao korisnik. U slučaju određivanja kemijskog sastava, korištena baza sadrži podatke o pojedinim metalima i legurama te njihovim definiranim kemijskim sastavima. Na temelju toga analizator nakon izvršenog mjerenja s određenom sigurnošću daje podatak o kojem metalu ili leguri se radi uz detaljno raspisan kemijski sastav. Prije mjerenja potrebno je napraviti kalibraciju uređaja u trajanju od trideset sekundi. Mjerenje se radi tako da se prednji dio analizatora prisloni uz površinu ispitivanog uzorka te tako zadrži tridesetak sekundi odnosno dok se ne čuje zvučni

signal koji signalizira da je mjerenje gotovo. Izvršena su tri mjerenja, po jedno na tri segmenta vratila. Slika 39. prikazuje mjesta na vratilu na kojima su izvršena mjerenja.



Slika 39. Mjesta ispitivanja kemijskog sastava

Nakon završenog mjerenja, na ekranu analizatora prikazan je kemijski sastav. Navedeno je o kojem materijalu se radi, ukoliko se ispitivani materijal nalazi u bazi podataka koju analizator koristi, udio prisutnih kemijskih elemenata izražen u postotcima i predloženi intervali udjela pojedinih elemenata za taj definirani materijal. Ispis rezultata ispitivanja kemijskog sastava s prijenosnog analizatora prikazan je na slici 40.



Slika 40. Prikaz rezultata određivanja kemijskog sastava

Rezultati određivanja kemijskog sastava pomoću prijenosnog XRF analizatora prikazani su u tablicama Tablica 6., Tablica 7. i Tablica 8.

Tablica 6. Kemijski sastav očitani na segmentu A

SEGMENT A			
Kemijski element	%	+/-	Specificirano (42CrMo4)
Si	0,27	0,05	[0,15-0,35]
Cr	0,87	0,03	[0,80-1,10]
Mn	0,83	0,04	[0,75-1,00]
Fe	97,67	0,28	[97,23-98,30]
Ni	0,00	/	Tramp[0,20]
Cu	0,11	0,02	Tramp[0,36]
Mo	0,26	0,01	[0,15-0,25]

Tablica 7. Očitani kemijski sastav na segmentu B

SEGMENT B (OKO PUKOTINE)			
Kemijski element	%	+/-	Specificirano (42CrMo4)
Si	0,28	0,05	[0,15-0,35]
Cr	0,86	0,03	[0,80-1,10]
Mn	0,82	0,04	[0,75-1,00]
Fe	97,79	0,28	[97,23-98,30]
Ni	0,00	/	Tramp[0,20]
Cu	0,00	/	Tramp[0,36]
Mo	0,25	0,01	[0,15-0,25]

Tablica 8. Očitani kemijski sastav na segmentu C

SEGMENT C			
Kemijski element	%	+/-	Specificirano (42CrMo4)
Si	0,36	0,05	[0,15-0,35]
Cr	0,90	0,03	[0,80-1,10]
Mn	0,88	0,04	[0,75-1,00]
Fe	97,33	0,29	[97,23-98,30]
Ni	0,14	0,04	Tramp[0,20]
Cu	0,13	0,02	Tramp[0,36]
Mo	0,26	0,01	[0,15-0,25]

Sva tri mjerenja dala su slične rezultate uz manje razlike udjela pojedinih materijala. Unatoč razlikama u udjelima pojedinih materijala, u sva tri mjerenja uređaj je ispitivani materijal deklarirao kao čelik za poboljšavanje 42CrMo4.

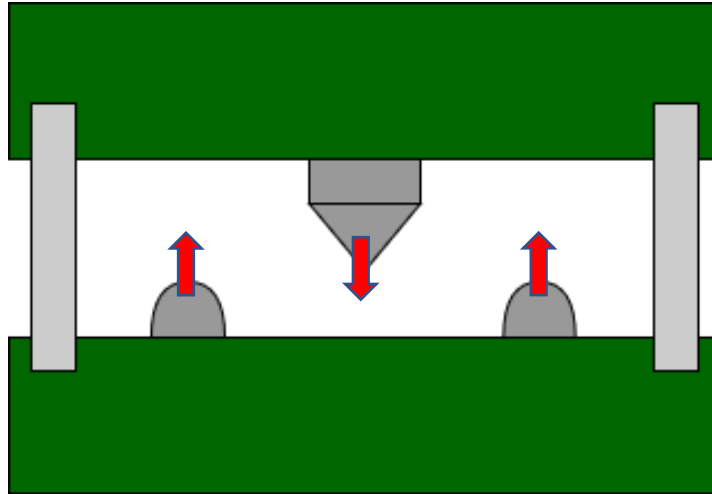
5.6 Slamanje vratila i čišćenje prijelomne površine

5.6.1 Slamanje vratila

Kako bi se mogli provoditi daljnji koraci u analizi oštećenja, bilo je potrebno slomiti vratilo na dva dijela. Zbog vanjskih dimenzija vratila i velike mase, za lomljenje vratila korištena je preša. Maksimalna sila koju korištena preša može postići iznosi 1000 kN. Dostupna su tri odvojena mjerna područja, do 100, 400 i 1000 kN. Ispitivanje je provedeno u mjernom području do 100 kN. Na donju čeljust postavljena su dva oslonca, a na pomičnu gornju čeljust trn, što je prikazano na slici 41. Takvim rasporedom oslonaca i lomnog trna u tri točke, osigurao se spreg sila koji je rezultirao naprezanjem koje je bilo dovoljno za lom vratila. Na Slici 42. shematski je prikazan raspored sila kojima je preša opteretila vratilo, a slika 43. prikazuje slomljeno vratilo.



Slika 41. Oslonci i trn na preši



Slika 42. Shematski prikaz sila na preši prilikom lomljenja vratila



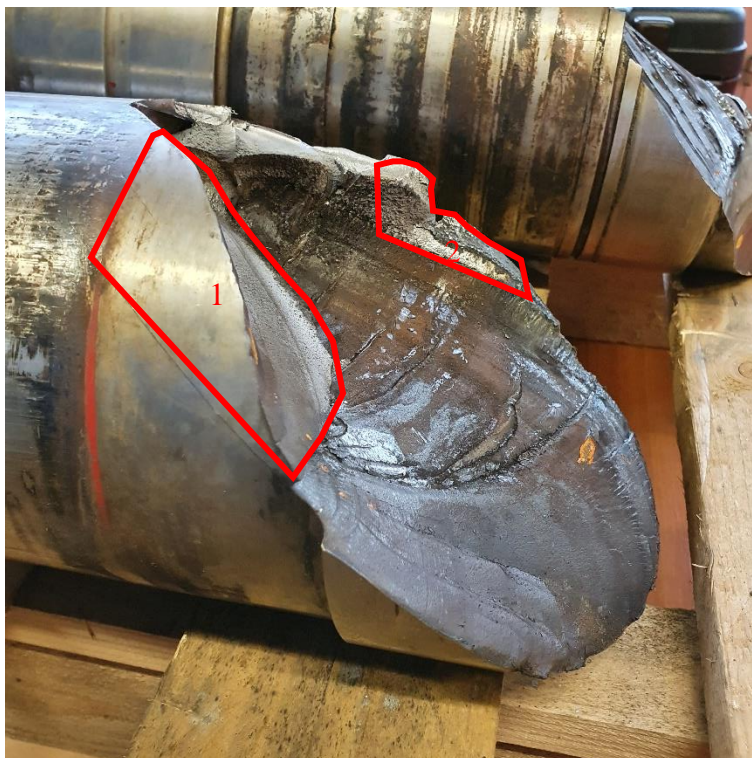
Slika 43. Slomljeno vratilo

5.6.2 Čišćenje prijelome površine

Nakon slamanja vratila, potrebno je očistiti prijelomnu površinu od nečistoća. Za čišćenje površine korišten je kompresor zraka velike snage. Čišćenje površine ključno je u procesu fraktografske analize, zato što omogućava i osigurava dobru vidljivost i stvaran prikaz prijelomne površine sa svim detaljima koji mogu biti izrazito važni u analizi.

5.7 Izrezivanje dijelova prijelomne površine

Kako bi se mogla provesti daljnja ispitivanja, bilo je potrebno izrezati dijelove lomne površine. Izrezana su dva komada s lomne površine koja je na A segmentu vratila, naznačeni na slici 44.



Slika 44. Izrezani dijelovi prijelomne površine

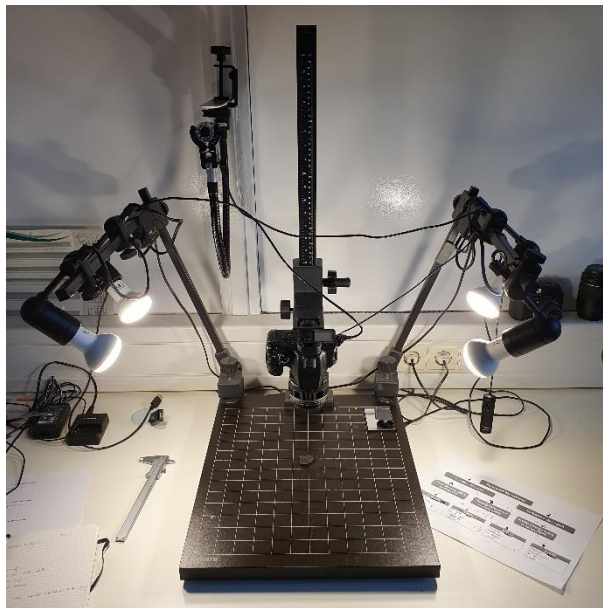
Za rezanje dijelova korištena je kutna brusilica s pločom za rezanje. Rez je napravljen tako da prati postojeću pukotinu u materijalu kako bi se komad što lakše odvojio. Nakon što je vratilo dovoljno zarezano, komad je odvojen uz pomoć tankih klinova i čekića. Slika 45. prikazuje izgled prijelomne površine na segmentu A prije (lijevo) i poslije (desno) izrezivanja dijelova za daljnju analizu.



Slika 45. Prijelomna površina segmenta A prije i poslje rezanja

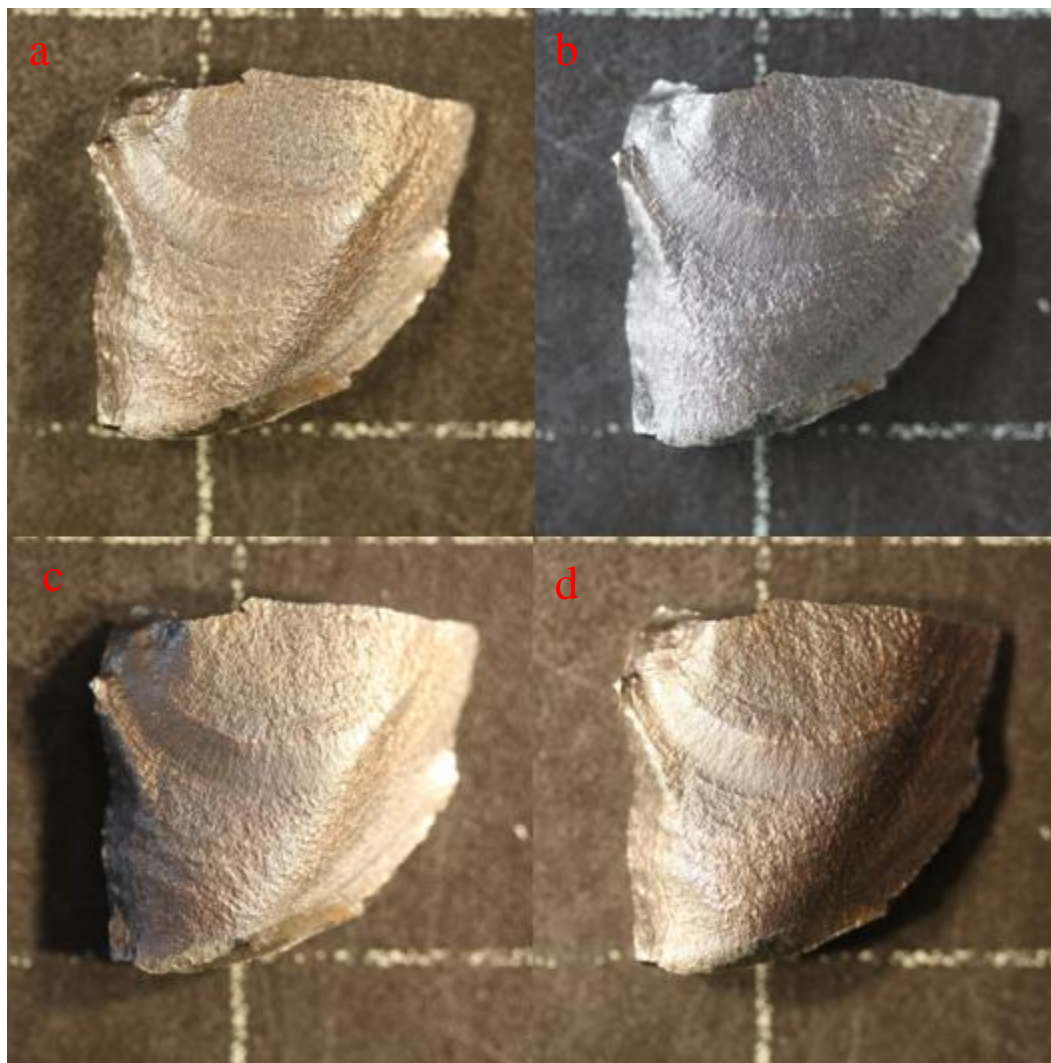
5.8 Makrofotografiranje

Sljedeći korak u fraktografskoj analizi je fotografiranje površine i njenih detalja digitalnom kamerom visoke razlučivosti i pripadajućim sustavom osvjetljenja. Korišteni sustav za fotografiranje prikazan je na slici 46.



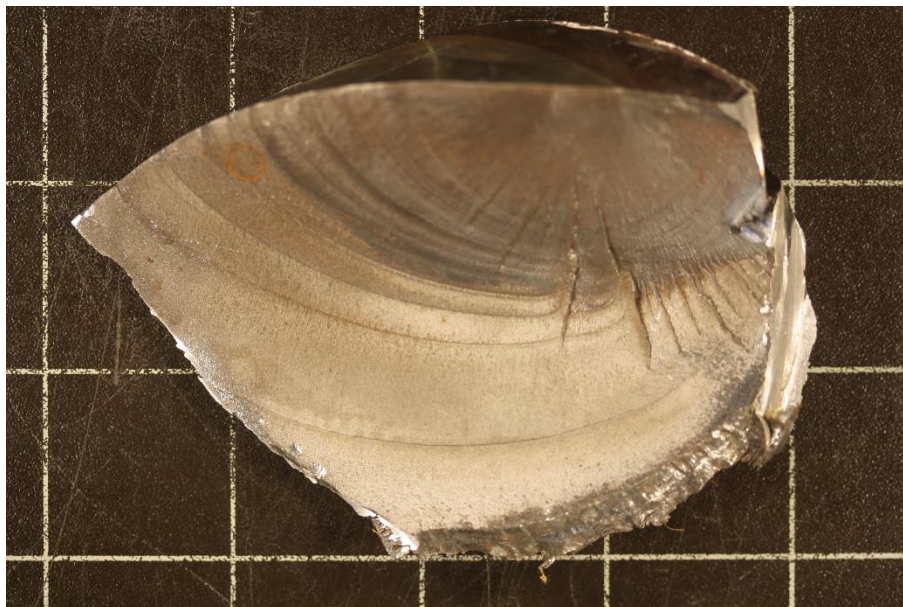
Slika 46. Sustav za fotografiranje

Prilikom fotografiranja prijelomnih površina, posebno kada je komad zakrivljen, izrazito je važno osigurati odgovarajuće osvjetljenje. Upravo zbog toga, korišteni sustav prikazan na slici 45. ima četiri izvora svjetla sa zasebnim kontrolama, kako bi se neutralizirali neželjeni utjecaji prirodnog svjetla. Slika 47. prikazuje kako smjer i količina osvjetljenja utječe na izgled prijelomne površine, a – dobro osvijetljeno, b – samo prirodno osvjetljenje, c – svjetlo samo s desne strane, d – svjetlo samo s lijeve strane.

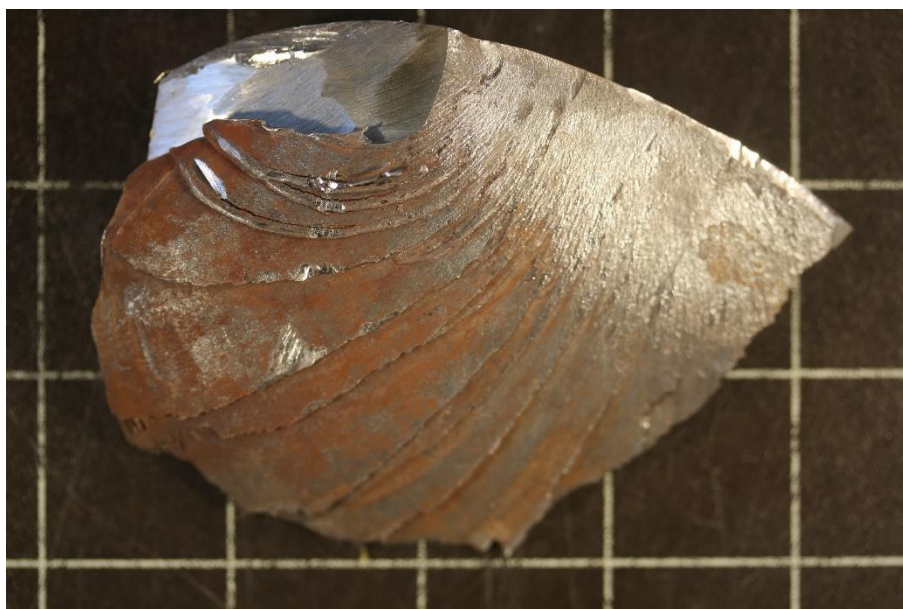


Slika 47. Utjecaj osvjetljenja na izgled površine

Na ovaj način su fotografirani izrezani komadi prijelomne površine, i jedan fragment (prikazan na slici 47.) koji se bio odlomljen u trenutku kada je vratilo dostavljeno u laboratorij. Izrezani dijelovi prijelomne površine prikazani su na slikama 48. do 51.



Slika 48. Izrezani komad 1, prednja strana



Slika 49. Izrezani komad 1, stražnja strana



Slika 50. Izrezani komad 2, vanjska strana



Slika 51. Izrezani komad 2, unutarnja strana

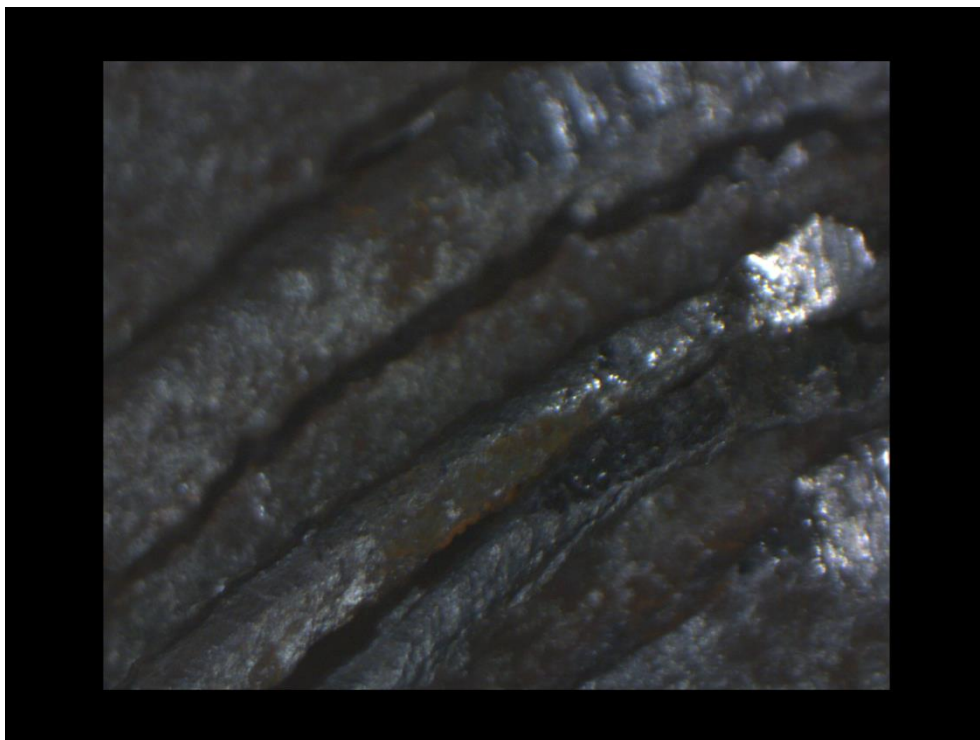
5.9 Stereomikroskopija

Nakon fotografiranja izrezanih komada i odlomljenog fragmenta, isti ti dijelovi promatrani su pod stereomikroskopom. Stereomikroskopija je provedena kako bi se bolje uočile karakteristike i specifičnosti na kontroliranim površinama. Korišten je stereomikroskop Mantis Elite proizvođača Vision Engineering (slika 52.), u kombinaciji s programskim paketom uEye cockpit koji služi za fotografiranje i pohranjivanje fotografija uzoraka.

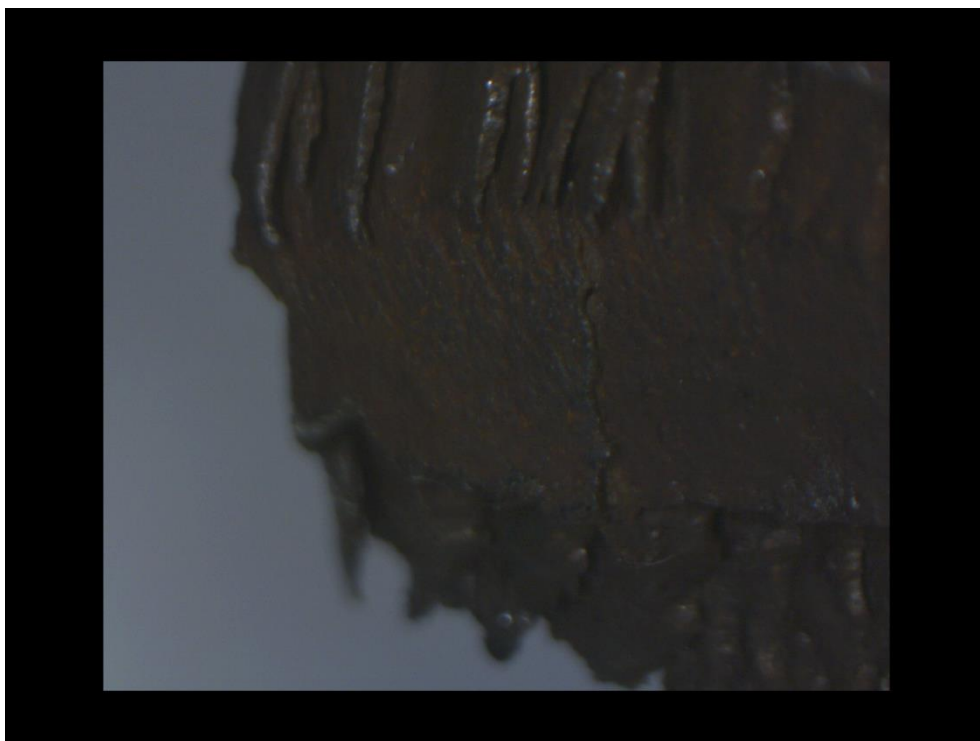


Slika 52. Stereomikroskop Mantis Elite

S obzirom na veličinu uzoraka koji su gledani pod stereomikroskopom i grubost površine, korišteno je povećanje od osam puta, iako uređaj ima i drugu leću s povećanjem od dvadeset puta. Prilikom mjerenja potrebno je pažljivo pozicionirati i fokusirati predmet, zbog toga što je područje koje je obuhvaćeno ugrađenom kamerom nešto manje od područja vidljivog na „okularu“ mikroskopa. Slika 53. prikazuje izgled korodirane površine gledane pod stereomikroskopom, a slika 54. korodirani rub izrezanog dijela prijelomne površine.



Slika 53. Korodirana površina pod stereomikroskopom (povećanje 8x)



Slika 54. Korodirani rub izrezanog dijela prijelomne površine (povećanje 8x)

5.10 Izrezivanje i priprema uzoraka za metalografska ispitivanja

5.10.1 Izrezivanje uzoraka

Uzorci za metalografiju, mjerenje mikrotvrdoće i određivanje kemijskog sastava izrezani su iz vratila, kako bi se mogla provesti potrebna ispitivanja. Iz A segmenta vratila pilom je izrezana „kriška“ vratila nakon čega su brusilicom izrezana dva uzorka. Na slici 55. je prikazana „kriška“ vratila i izrezani uzorci na kojima će biti provođena ispitivanja.



Slika 55. Uzorci za metalografiju

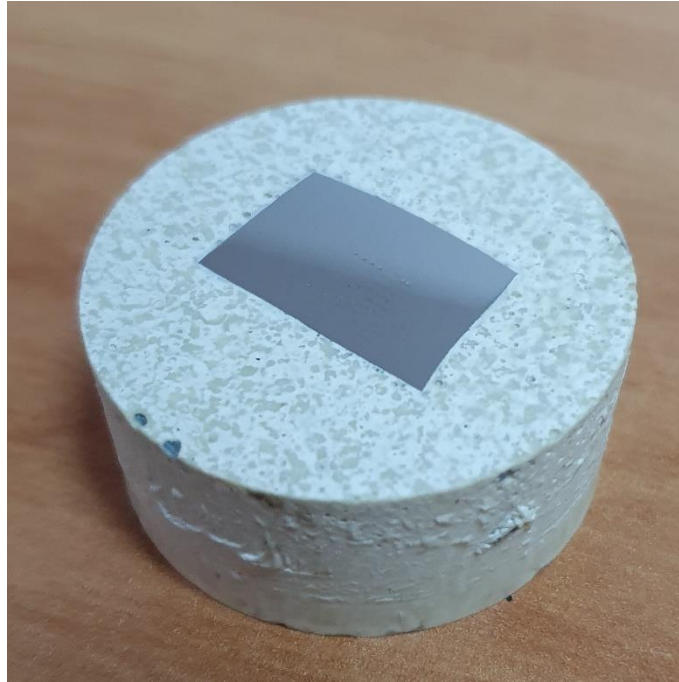
Jedan od uzoraka je iskorišten za određivanje kemijskog sastava, a drugi je pripremljen za metalografiju i mjerenje mikrotvrdoće.

5.10.2 Pripremanje uzorka za metalografiju

Postupak pripreme uzorka za metalografiju sastoji se od više koraka, a oni su:

1. Izlijevanje uzorka u polimernu masu (Slika 56.)

Metalni uzorak se zalijeva polimernom masom u kalupu standardne dimenzije. Uzorci se lijevaju u oblik diska radi lakšeg rukovanja, te točnog pozicioniranja na stroju za poliranje.



Slika 56. Uzorak zaliven polimernom masom

2. Brušenje

Nakon što se polimerna masa stvrdnula, uzorak je spreman za prvi korak pripreme površine za metalografsko ispitivanje. Površina uzorka se brusi prema sljedećim parametrima:

- Brzina vrtnje: 300 okretaja u minuti
- Voda kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje u svim koracima
- Opterećenje uzorka ručnom silom (≈ 200 N)
- Brusni papiri gradacije: 120, 320, 600, 1200, 2400, 4000

Na slici 57. prikazan je korišteni uređaj za brušenje Presi Minitex 233.



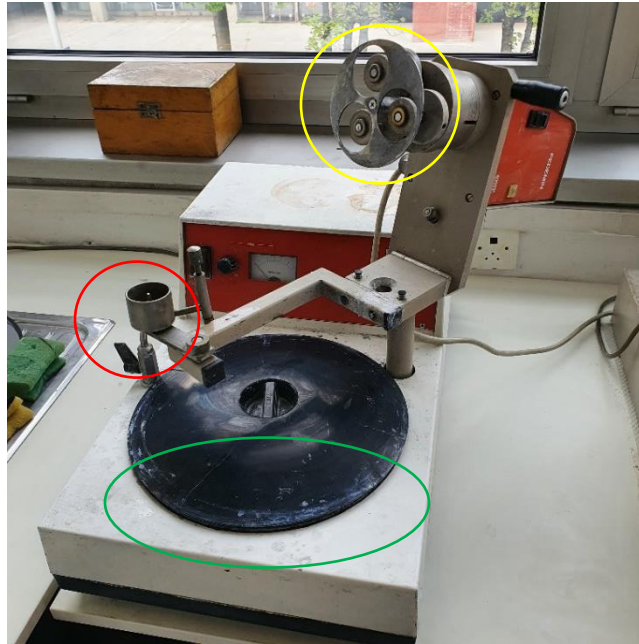
Slika 57. Uređaj za brušenje Presi Minitech 233

3. Poliranje

Nakon što je uzorak doveden u brušeno stanje, za analizu mikrostrukture i mjerenje tvrdoće potrebno ga je dovesti u polirano stanje. Na slici 58. prikazan je korišteni stroj za poliranje. Uzorak se postavlja u jedno od tri predviđena mjesta, te se tijekom poliranja taj dio stroja okreće u jednom smjeru dok se ploča okreće u suprotnom.

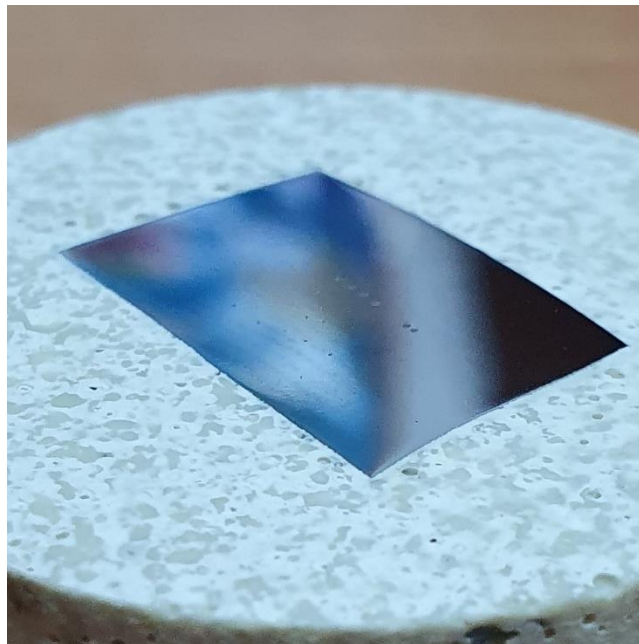
Parametri procesa su sljedeći:

- 150 okretaja u minuti;
- Industrijski lubrikant kao sredstvo za podmazivanje i hlađenje;
- Prema potrebi moguće je poliranje u dva stupnja;
 - Prvi stupanj – veličina abrazivnih čestica u pasti za poliranje iznosi 3 μm ;
 - Drugi stupanj – veličina abrazivnih čestica u pasti za poliranje iznosi 0,03 μm .



Slika 58. Uređaj za poliranje

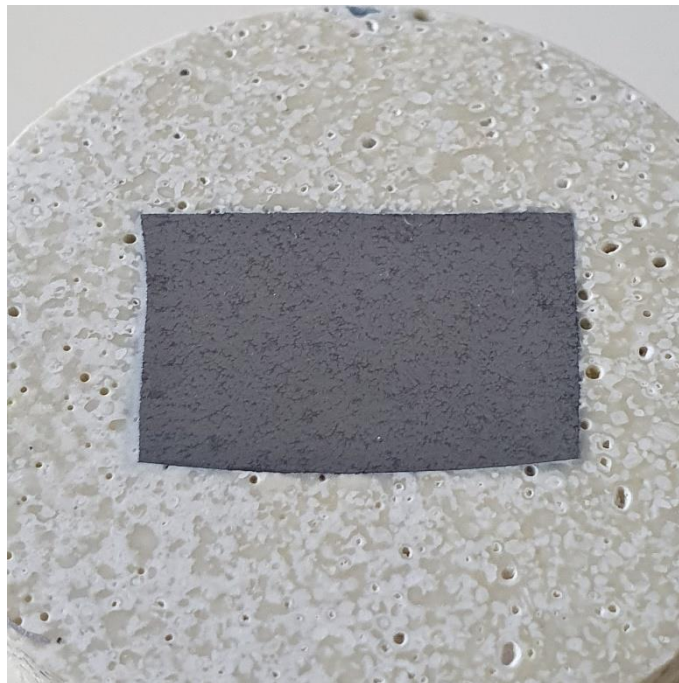
Na slici je crveno naznačena posudica u koju se ulijeva lubrikant koji slobodno ističe na rotirajuću ploču (označeno zeleno). Žuto su označeni okviri predviđena mjesta za tri uzorka kružnog oblika, koji se mogu istovremeno polirati. Slika 59. prikazuje površinu uzorka nakon poliranja (polirano stanje).



Slika 59. Polirano stanje površine uzorka

4. Nagrizanje

Konačni korak u pripremi uzorka za metalografiju je nagrizanje površine. Nagrizanje se koristi kako bi se što jasnije vidjela mikrostruktura. Faze prisutne u mikrostrukтури različito reagiraju na prisutnost kiseline, i tako se postiže razlika u „boji“ pojedinih faza kada se promatraju na mikroskopu. Za nagrizanje korištena je 3 % - tna otopina nitala (otopina dušične kiseline), a postupak se provodi u digestoru zbog sigurnosnih razloga. Slika 60. prikazuje izgled površine uzorka u nagriženom stanju.



Slika 60. Nagriženo stanje površine uzorka

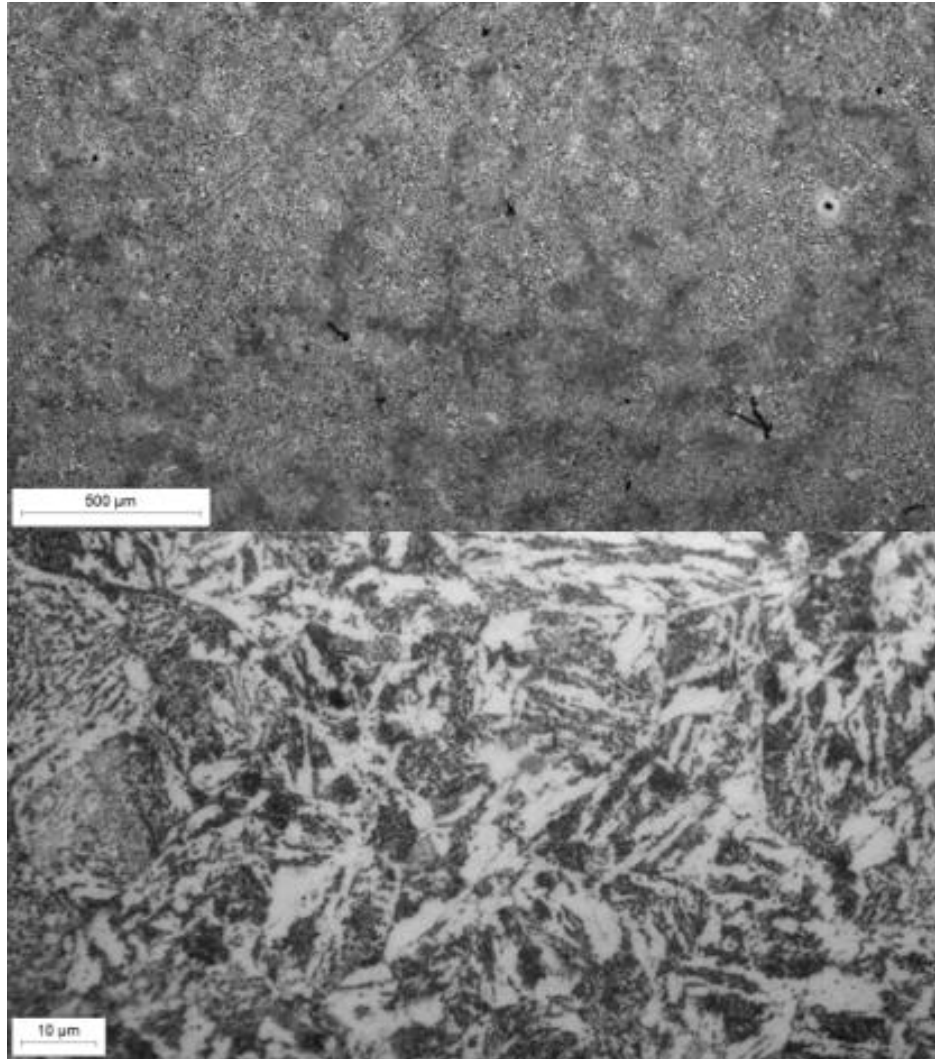
5.11 Metalografija – određivanje mikrostrukture

Nakon brušenja, poliranja i nagrivanja, uzorak je bio spreman za metalografiju. Metalografija je grana znanosti koja se bavi proučavanjem i određivanjem mikrostrukture metala i metalnih legura, uz pomoć svjetlosnih ili elektronskih mikroskopa (minimalno povećanje 25 puta). Korišten je svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (prikazan na slici 61.) povezan na stolno računalo u kombinaciji s programskim paketom IC Measure koji je korišten za pohranjivanje slika mikrostrukture za daljnju analizu.



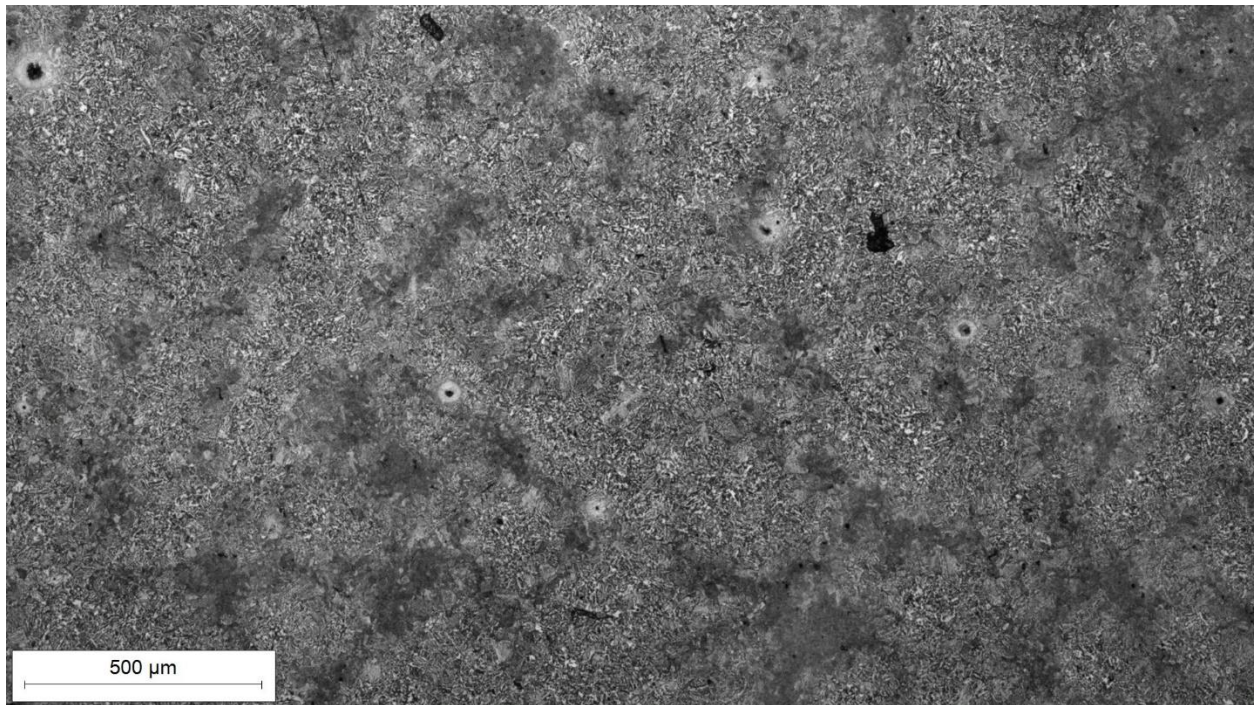
Slika 61. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Na dva mjesta na uzorku mikrostrukture je fotografirana s različitim raznim povećanja. Korištena povećanja su bila: 50, 100, 200, 500 i 1000 puta. Na slici 62. prikazana je razlika u izgledu mikrostrukture između najmanjeg (50 puta) i najvećeg korištenog povećanja (1000 puta). Detaljnija analiza mikrostrukture provedena je u sljedećim poglavljima.

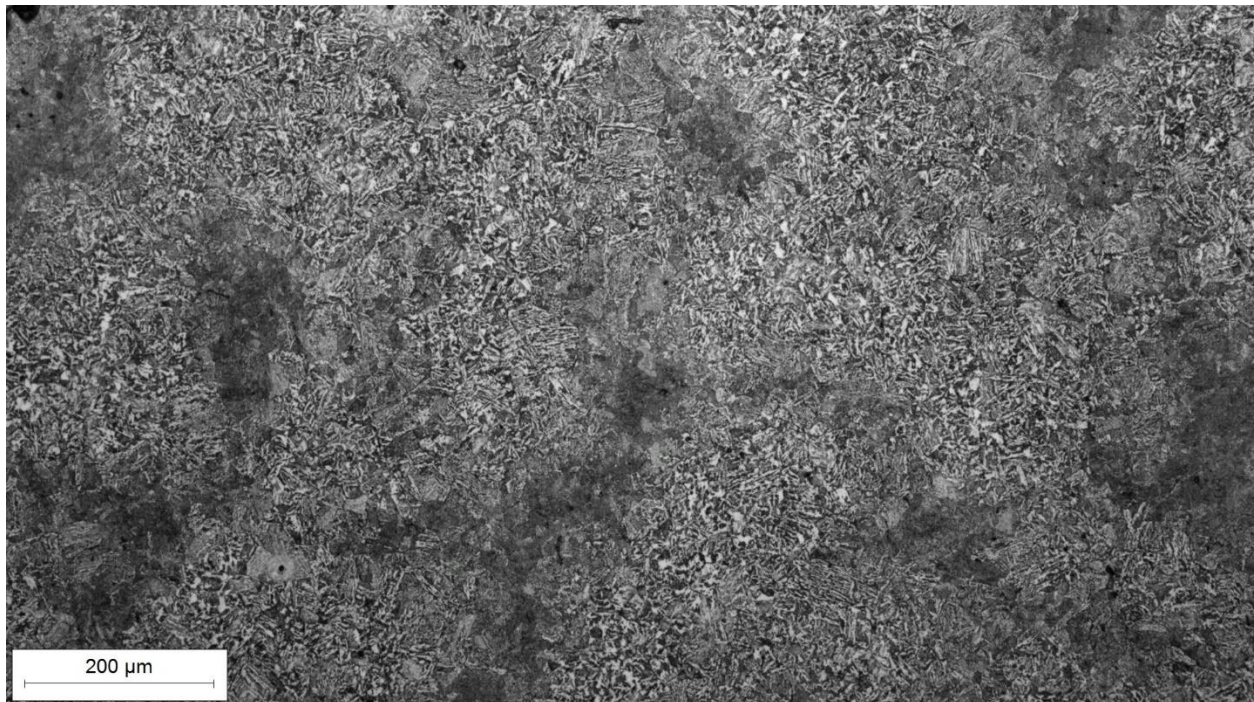


Slika 62. Izgled mikrostrukture pri različitim povećanjima (50x i 1000x)

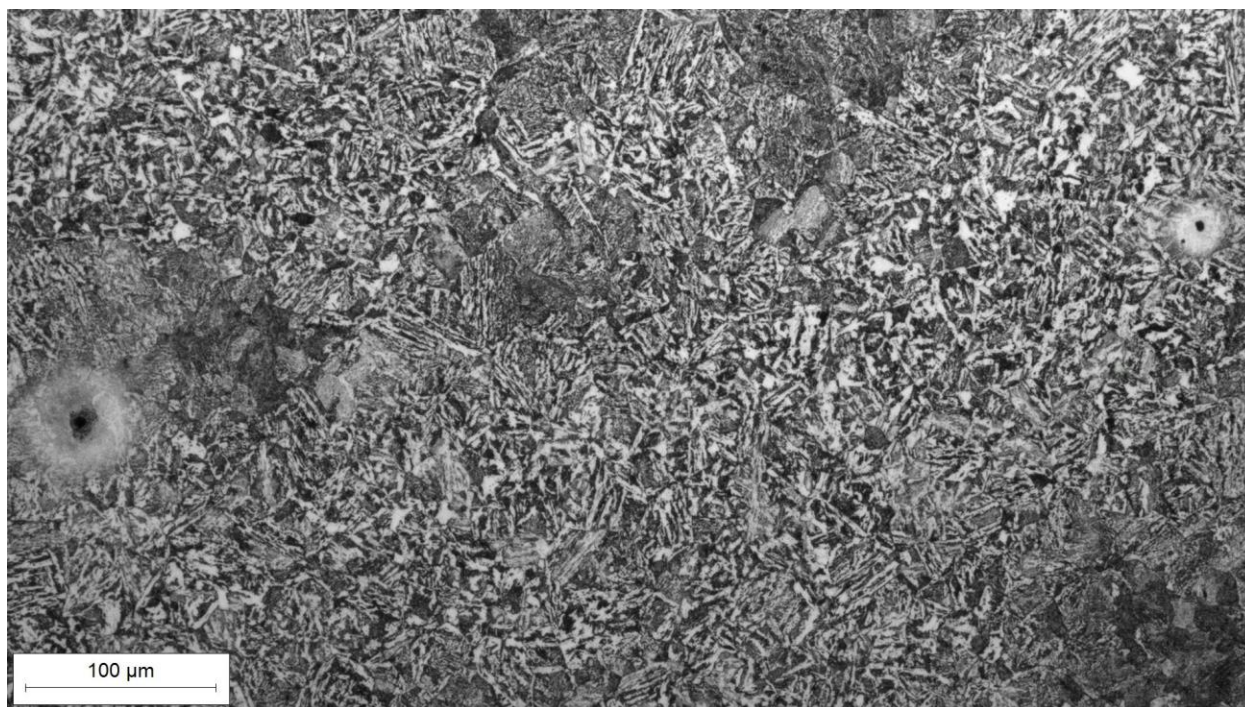
Fotografirane su dvije pozicije na uzorku, kako bi se bolje utvrdilo radi li se o homogenom materijalu. Slike 63. do 68. prikazuju izgled mikrostrukture pri različitim povećanjima na A i B pozicijama fotografiranja.



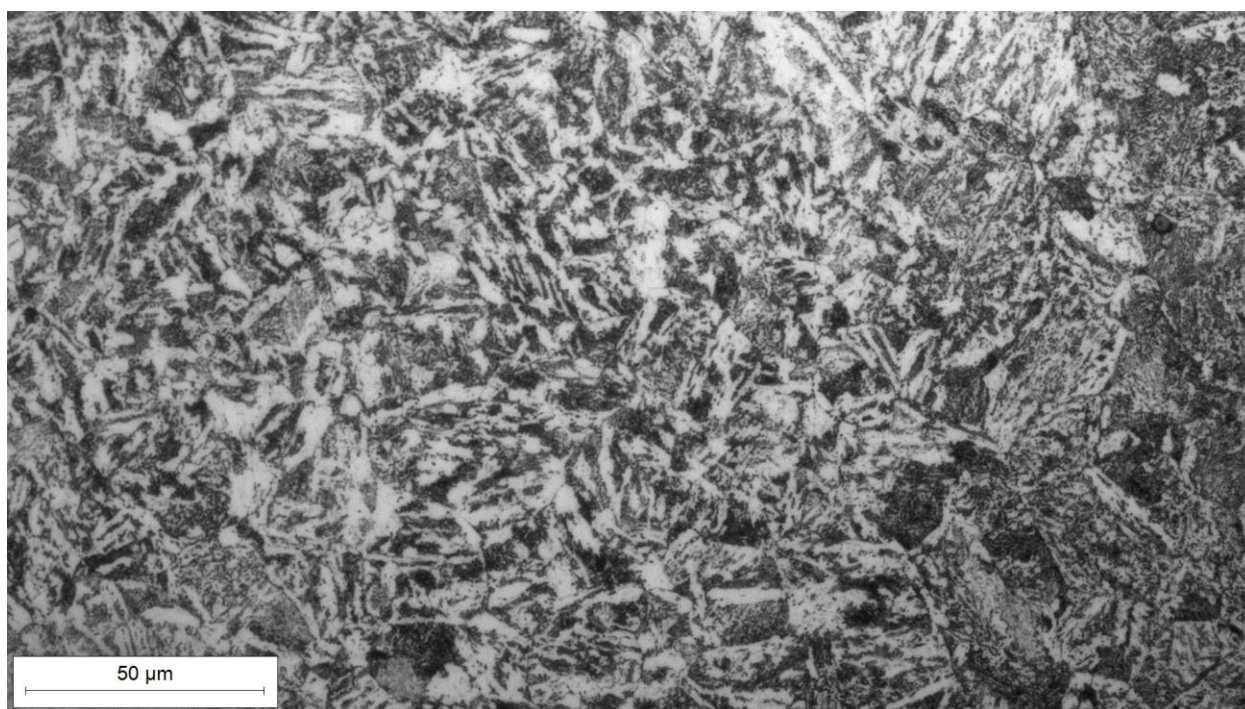
Slika 63. Povećanje 50x, pozicija A



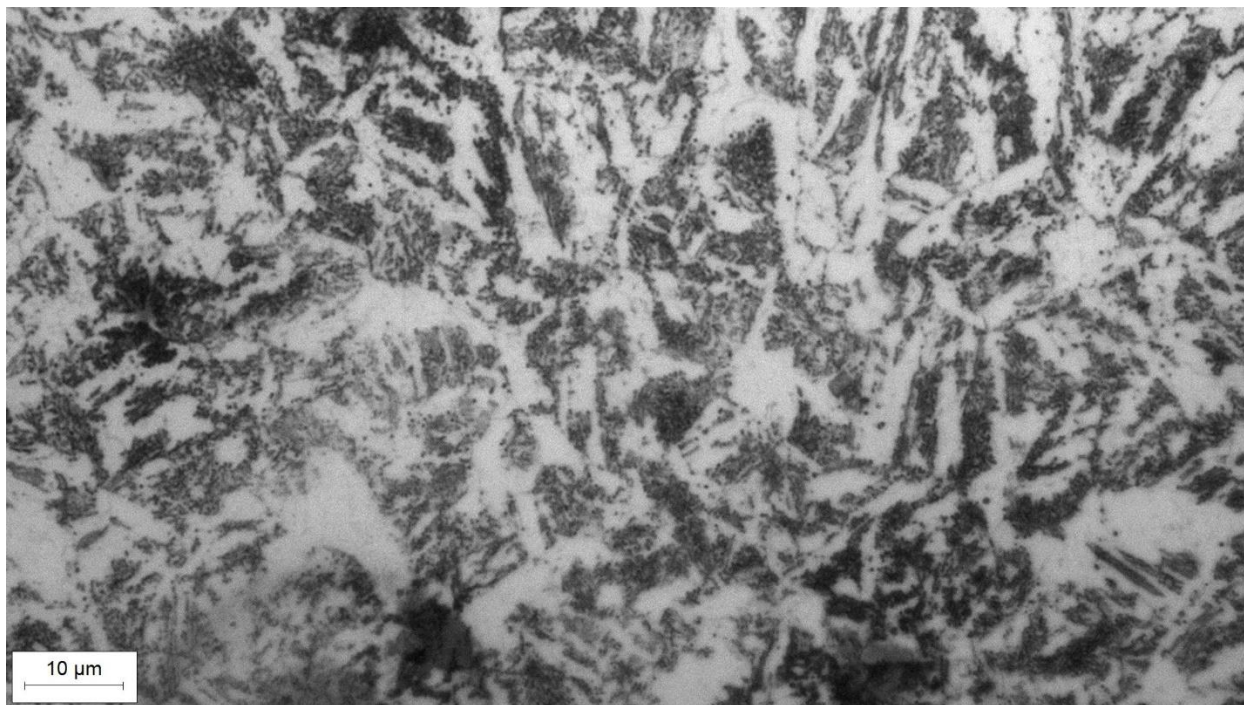
Slika 64. Povećanje 100x, pozicija A



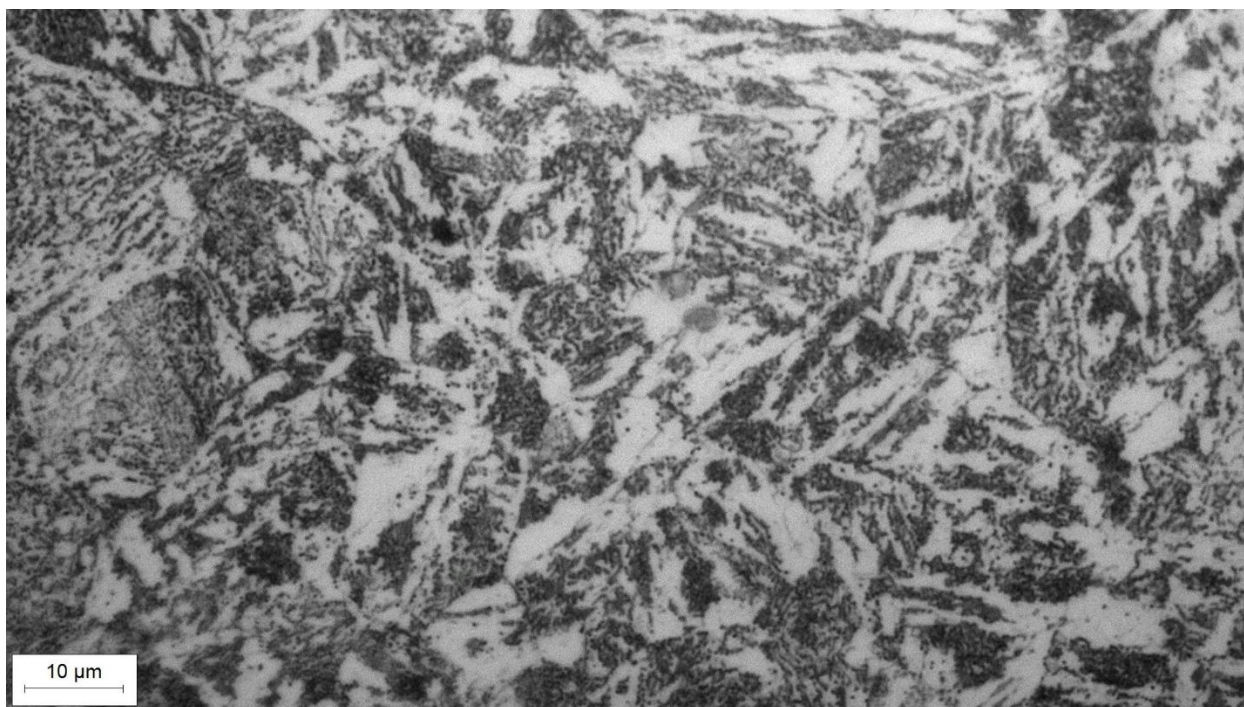
Slika 65. Povećanje 200x, pozicija A



Slika 66. Povećanje 500x, pozicija A



Slika 67. Povećanje 1000x, pozicija A



Slika 68. Povećanje 1000x, pozicija B

5.12 Određivanje kemijskog sastava

Osim površinskog određivanja kemijskog sastava, proveden je i postupak optičke emisijske spektrometrije. Izrezani uzorak (prikazan na slici 55.) iskorišten je za određivanje kemijskog sastava. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje, te je korišten optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO. U Tablica 9. navedeni su udjeli pojedinih kemijskih elemenata u sastavu ispitivanog materijala.

Tablica 9. Kemijski sastav određen optičkom emisijskom spektrometrijom

Oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
NU	0,38-0,43	0,34	0,86	0,011	0,009	0,94	0,24	0,15	0,12	ostatak

5.13 Mjerenje tvrdoće

Iako je ranije već provedeno mjerenje tvrdoće na površini vratila, potrebno je izmjeriti tvrdoću i na izrezanom uzorku ali i po cijelom presjeku vratila. Mjerenje je provedeno na više mjesta i s dva različita opterećenja, HV1 i HV5. Vickers-ova metoda mjerenja tvrdoće detaljnije je opisana u potpoglavlju 5.4 . Ova mjerenja tvrdoće provedena su na Zwick/Roell tvrdomjeru ZHV μ (slika 69.) u kombinaciji sa službenim programskim paketom ZH μ za automatsko mjerenje.



Slika 69. Zwick/Roell ZHV μ tvrdomjer

Osim na izrezanom uzorku (slika 55.) mjerenje tvrdoće provedeno je i po cijeloj duljini presjeka izrezane „kriške“ vratila kako bi se provjerilo radi li se o homogenom materijalu. Provedeno je

osam mjerenja HV5 s jedne i druge strane provrta (slika 70.) na sredini presjeka te su rezultati bili zadovoljavajući s prihvatljivim rasponom vrijednosti.



Slika 70. Mjesta mjerenja tvrdoće po cijeloj duljini presjeka

Osim površinskog mjerenja tvrdoće, provedena su i mjerenja tvrdoće na izrezanom uzorku i po cijeloj duljini presjeka kako bi se utvrdilo radi li se o homogenom materijalu. Za razliku od površinskog mjerenja koje je bilo HV10, mjerenja na uzorku su bila HV1 (sila opterećenja $F \approx 10\text{N}$) i HV5 (sila opterećenja $F \approx 50\text{N}$). Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku i po presjeku prikazani su u tablicama Tablica 10. i Tablica 11.

Tablica 10. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku, HV1 i HV5

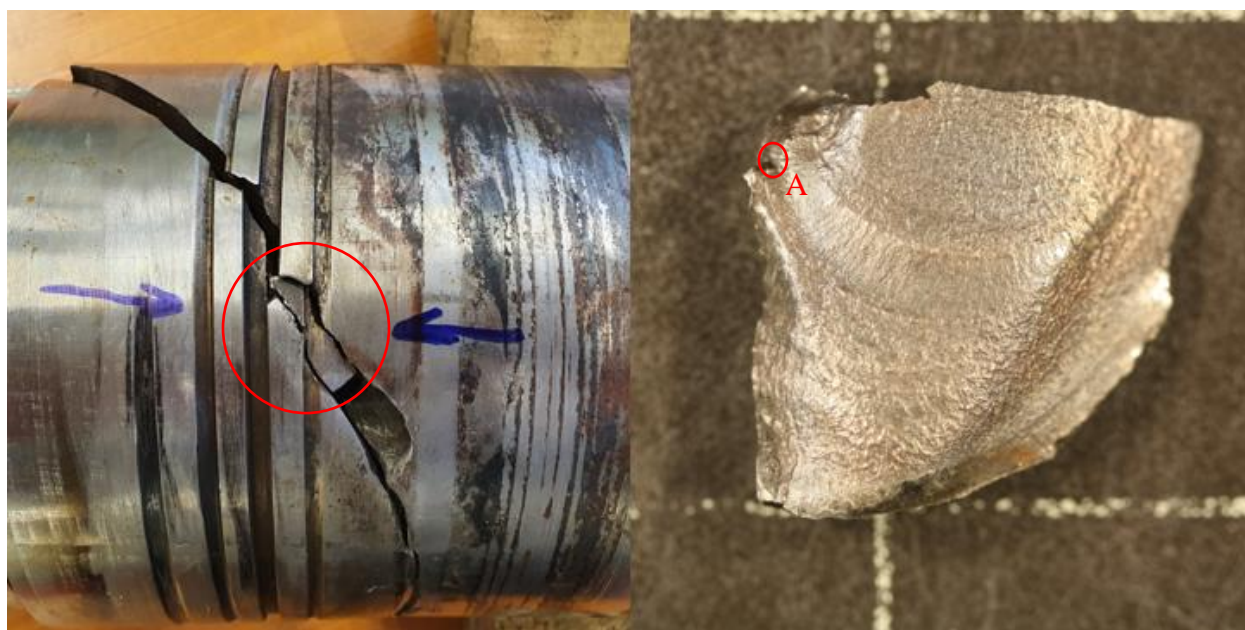
MJERENJE	Uzorak	
	HV1	HV5
1)	251	249
2)	241	241
3)	249	251
4)	228	225
5)	226	277
6)	244	244
PROSJEK	239,8	247,8

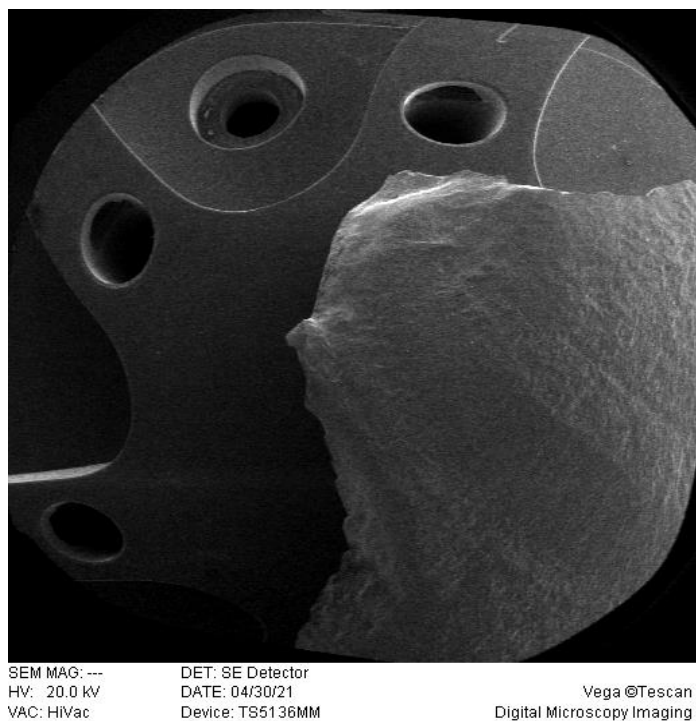
Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće po presjeku, HV5

MJERENJE	Presjek, HV5
1)	271
2)	265
3)	265
4)	277
5)	280
6)	274
7)	274
8)	265
PROSJEK, HV5	271,4

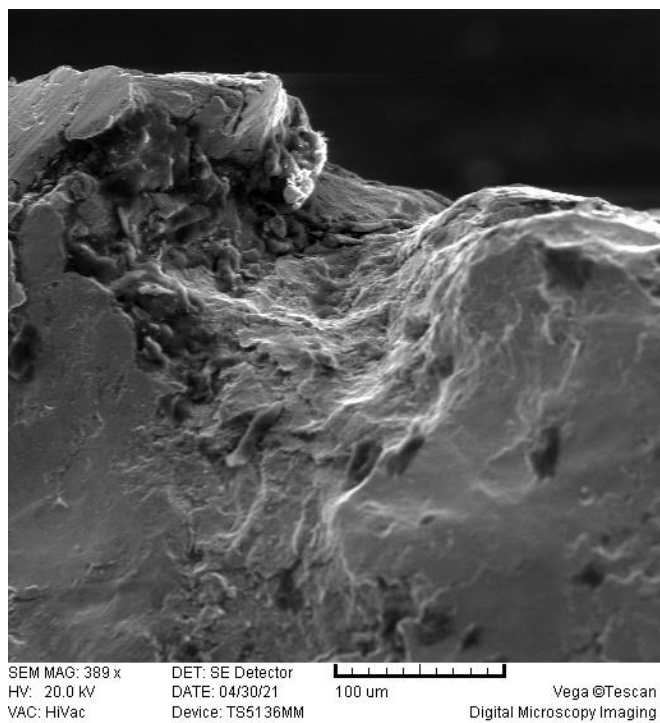
5.14 Skenirajući elektronski mikroskop – SEM Analiza

U sklopu procesa analize korišten je i skenirajući elektronski mikroskop (SEM) kako bi se detaljno pregledali određeni dijelovi vratila. Detaljno je proučavan fragment vratila koji je već bio odlomljen kada je vratilo dostavljeno u laboratorij. Korišten je skenirajući elektronski mikroskop Tescan Vega sa SE i BSE detektorima koji omogućavaju detaljnu analizu topografije uzorka, i elementnih kontrasta. Slika 71. prikazuje položaj analiziranog fragmenta na vratilu i oblik fragmenta kada je izvađen van, slika 72. izgled površine pod SEM-om, a slika 73. izolirani detalj A na površini pod velikim povećanjem.

**Slika 71. Analizirani fragment vratila**



Slika 72. Površina fragmenta na SEM-u



Slika 73. Detalj A prikazan na SEM-u

6 ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju rada, analizirani su rezultati dobiveni provedenim mjerenjima. Tabela podaci uspoređeni su s deklariranim svojstvima materijala od kojih se pretpostavlja da je vratilo izrađeno. Nakon usporedbe tabelarnih podataka, provedena je analiza površine u poliranom stanju i mikrostrukture, promatrane na svjetlosnom mikroskopu. Također su analizirane makroskopske i mikroskopske karakteristike prijelomne površine koje su zapažene prilikom vizualne kontrole golim okom, fotoaparatom i skenirajućim elektronskim mikroskopom.

6.1 Usporedba kemijskog sastava

Kao što je ranije u radu navedeno, provedena je analiza kemijskog sastava materijala vratila dvjema metodama. Površinska analiza pomoću prijenosnog XRF analizatora i analiza na izrezanom uzorku postupkom optičke emisijske spektrometrije. Rezultati, odnosno udjeli pojedinih elemenata su bili vrlo slični (male razlike u izmjerenim udjelima pojedinih elemenata), uz jednu značajnu razliku dvije metode analize. Prijenosni XRF analizator nema mogućnost određivanja udjela ugljika u kemijskom sastavu, dok optička emisijska spektrometrija određuje udjele svih prisutnih elemenata u uzorku. Tijekom površinske analize kemijskog sastava analizator je na temelju usporedbe detektiranih elemenata i njihovih udjela u materijalu s bazom podataka koja je pohranjena u uređaju, deklarirao materijal od kojeg je vratilo izrađeno kao čelik iz skupine čelika za poboljšavanje. Nakon provedene optičke emisijske spektrometrije i dobivanja podatka o udjelu ugljika u kemijskom sastavu, potvrdilo se da se radi o tom materijalu. Prema udjelu ugljika koji je iznosio 0,38 – 0,43 % i udjelu ostalih kemijskih elemenata može se zaključiti da se radi o inicijalno pretpostavljenom čeliku iz skupine čelika za poboljšavanje 42CrMo4. U tablici 12. prikazana je usporedba udjela kemijskih elemenata dobivenih optičkom emisijskom spektrografijom, i deklariranih udjela za čelike 42CrMo4 [7].

Tablica 12. Usporedba kemijskih sastava

Kemijski element	%	
	Ispitivani materijal	Deklarirani sastav za 42CrMo4 [7]
Krom, Cr	0,940	0,800 - 1,100
Mangan, Mn	0,860	0,750 - 1,000
Ugljik, C	0,380 - 0,430	0,380 - 0,430
Silicij, Si	0,340	0,150 - 0,300
Molibden, Mo	0,240	0,150 - 0,250
Sumpor, S	0,009	0,040
Fosfor, P	0,011	0,035
Nikal, Ni	0,150	/
Bakar, Cu	0,120	/
Željezo, Fe	ostatak	ostatak

Izmjerene vrijednost udjela ostalih kemijskih elemenata nalaze se unutar ili na samoj granici definiranih raspona.

6.2 Usporedba izmjerene i deklarirane tvrdoće

Za pretpostavljeni čelik definirana je i tvrdoća u Vickersima (dostupne su vrijednosti i dobivene i drugim metodama, ali zbog konzistentnosti uspoređivane će biti vrijednosti u Vickersima). Provedeno je više površinskih mjerenja tvrdoće vratila, mjerenje tvrdoće na uzroku i mjerenje tvrdoće po cijelom promjeru presjeka. Tablica 13. prikazuje usporedbu prosječnih vrijednosti mjerenja provedenih na površini, uzorku i promjeru presjeka s deklariranom tvrdoćom materijala.

Tablica 13. Usporedba vrijednosti tvrdoće

Tvrdoća [HV]	Analizirano vratilo			
	Površina	Uzorak		Presjek
	HV10	HV1	HV5	HV5
	260,5	239,8	247,8	271,4

Povećane vrijednosti tvrdoće ukazuju na to da je provedena određena vrsta toplinske obrade, koja je rezultirala povećanjem tvrdoće po svim dijelovima vratila. Korišteni čelik može se podvrgnuti različitim postupcima toplinske, i različitim režimima kaljenja i žarenja.

Ovaj čelik se često koristi u kaljenom i žarenom stanju, pri čemu se izbjegava žarenje u temperaturnom rasponu od 230 do 370°C kako bi se izbjeglo povećanje krhkosti materijala [9]. Toplinskom obradom ovog čelika moguće je postići mikrostrukturu popušteni martenzit čija vrijednost tvrdoće iznositi i do ≈ 550 HV. No izmjerene vrijednosti se kreću oko 250 HV5 što ukazuje na to da se radi o višefaznoj strukturi. Pogrešno proveden postupak toplinske obrade može imati negativne posljedice na mehanička svojstva materijala. Zbog prisutnosti nečistoća i elemenata poput sumpora i fosfora koji mogu uzrokovati povećanje krhkosti, potrebno je pažljivo provesti toplinsku obradu. Ispitivanja provedena u sklopu istraživanja iz 2020. godine ukazuju da je koncentracija čestica sumpora i fosfora na granicama kristalnih zrna bila veća kod uzoraka koji su podvrgnuti toplinskoj obradi [10].

6.3 Makroskopska analiza – vizualna kontrola

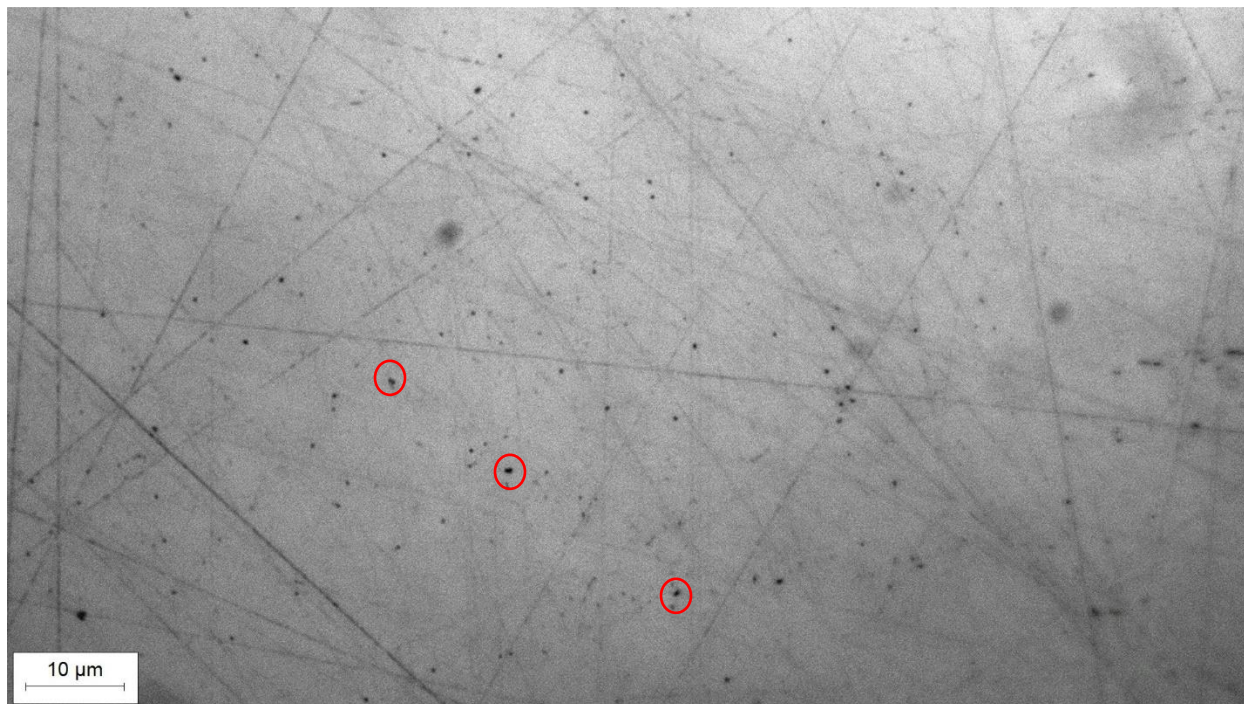
Kroz više vrsta makroskopske analize (golim okom, fotoaparatom, povećalom) zapažene su sljedeće karakteristike. Izgled i kut prijelomne površine ukazivali su na lom uzrokovan umorom materijala u prisustvu torzijskog i savojnog opterećenja. Glavna prijelomna površina bila je pod kutem od $\approx 45^\circ$ što je karakteristično za torzijsko naprezanje. Površina je imala spiralni uzorak u području trajnog loma, što je također jedna od karakteristika umornog loma uz torzijsko opterećenje. Početak pukotine nalazio se u blizini ureza po cijelom opsegu presjeka, i izgled prijelomne površine ukazivali su na prisutnost koncentratora naprezanja. Površina vratila bila je većim dijelom prihvatljiva, uz određene posljedice eksploatacije poput mjestimičnih blagih oštećenja ili nečistoća.

6.4 Stereomikroskopija

Nakon što je provedena makroskopska analiza dijelovi vratila i prijelomne površine su izrezani kako bi se mogle provoditi daljnji koraci u analizi. Prvi sljedeći korak bila je stereomikroskopija. Uzorci su gledani pod povećanjem od osam puta. Zbog veličine uzoraka i izgleda površine nije bilo potrebe za korištenjem većeg povećanja (dvadeset puta) na stereomikroskopu s obzirom da su se promatrane karakteristike dovoljno dobro mogle analizirati i s manjim povećanjem. Pregledana su dva izrezana dijela prijelomne površine (slika 43.) i fragment koji je već bio odlomljen u trenutku kada je vratilo dostavljeno u laboratorij (slika 70.). Tijekom stereomikroskopije uočene se određene pukotine i brazde na površinama promatranih komada, te su ti dijelovi kasnije promatrani na SEM-u.

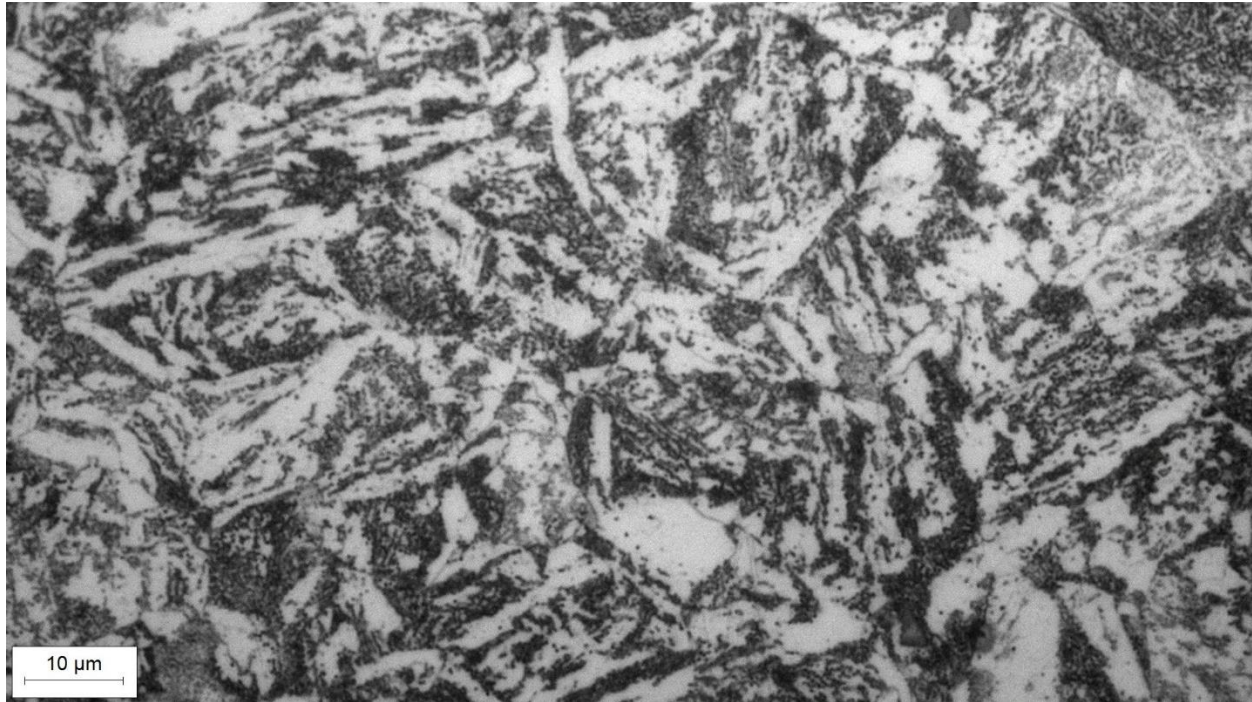
6.5 Metalografija

Proces izrade i obrade metalografskog uzorka opisan je u ranijim poglavljima, kao i postupak metalografske analize. Uzorak je promatran na više pozicija u dva stanja, poliranom i nagriženom. Svrha kontrole u poliranom stanju je proučavanje površine i detekcija potencijalnih uključaka (npr. karbidi), izlučevina ili nečistoća. Slika 74. prikazuje površinu u poliranom stanju pri povećanju od tisuću puta.



Slika 74. Polirano stanje, povećanje 1000x

Osim jasno vidljivih brazdi (linije na površini) koje su posljedica procesa poliranja, primijećene su i sitne crne točkice na površini (označeno crveno na slici). Zbog rasprostranjenosti po cijeloj površini uzorka pretpostavljeno je da se radi o površinskim nečistoćama koje su posljedica rukovanja ili procesa priprema uzorka, no to je potrebno potvrditi daljnjim ispitivanjima Slika 75. prikazuje promatranu mikrostrukturu uzorka pri povećanju od tisuću puta, a slika 76. prikazuje izgled mikrostrukture čelika 42CrMo4 u obliku šipke nakon što je provedena austenitizacija na 845°C, kaljenje u ulju na 65°C i žarenje u trajanju od dva sata pri temperaturi od 620°C. Struktura je mješavina martenzita, ferita i karbida. Uzorak je nagrižen 2% - tnom otopinom nitala i povećanje na mikroskopu je 750 puta [11].



Slika 75. Mikrostruktura, povećanje 1000x

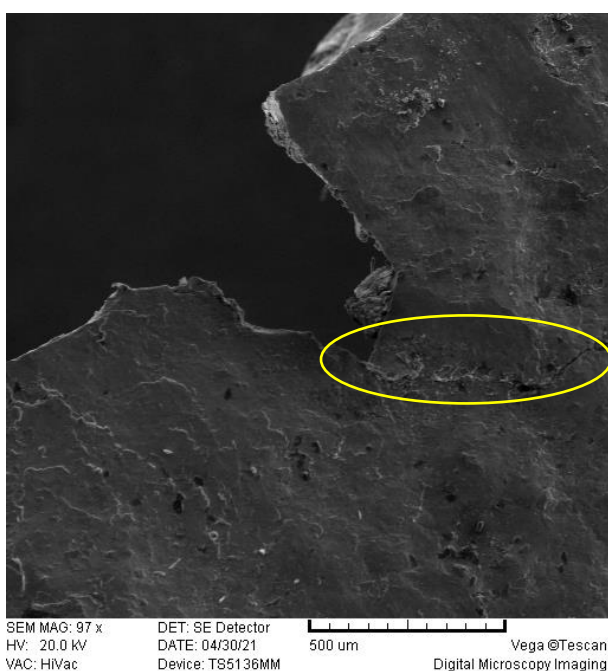


Slika 76. Primjer mikrostrukture iz literature -42CrMo4 čelična šipka, austenitizirano na 845°C, kaljeno u ulju na 65°C i žareno dva sata pri na 620°C. Struktura je mješavina martenzita, ferita i karbida. Uzorak je nagrižen 2% - tnom otopinom nitala, povećanje 750x[11]

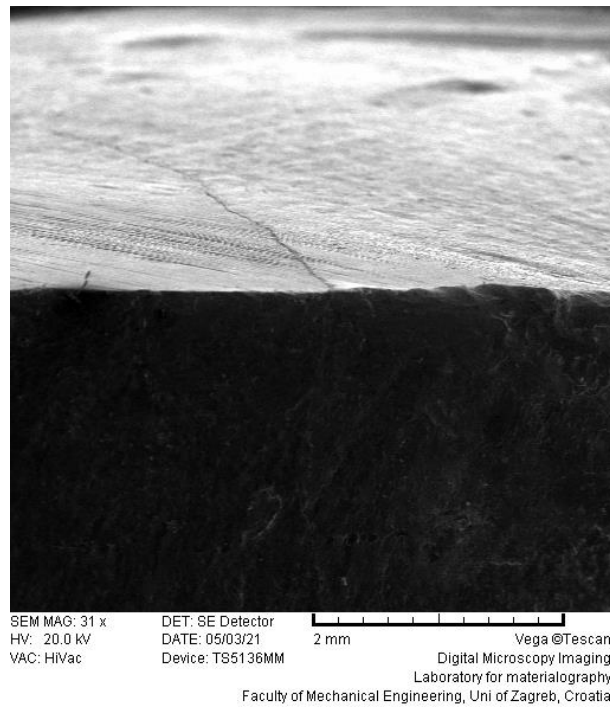
Tijekom analize na svjetlosnom mikroskopu, utvrđeno je da je raspodjela faza i opći izgled mikrostrukture jednolik tj. površina je homogena po cijeloj površini ispitivanog uzorka. Iz usporedbe slika 75. i 76. je jasno da nije postignuta 100% -tna struktura popušteni martenzit, već da se radi o višefaznoj strukturi čiji značajno nastanak ovisi o provedenoj toplinskoj obradi. Da bi se ustanovila točna struktura potrebno je mjerenje tvrdoće pojedine faze te analiza kemijskog sastava. Ta ispitivanja nisu do kraja provedena.

6.6 Skenirajući elektronski mikroskop – SEM analiza

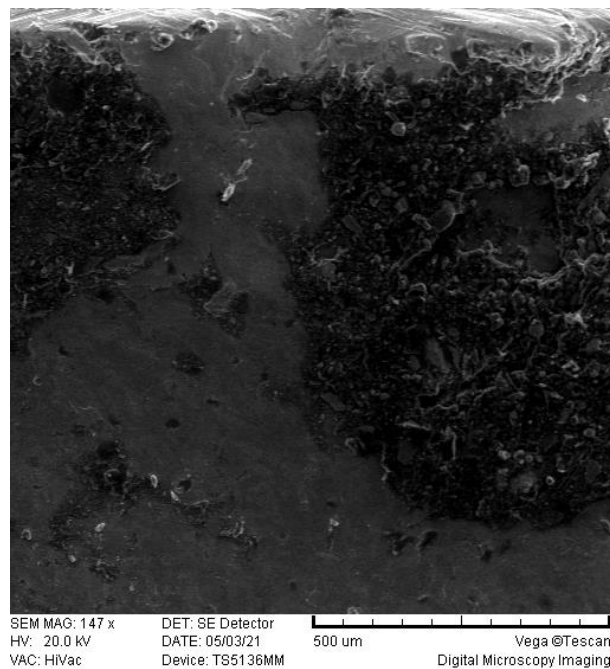
U sklopu SEM analize pregledano je nekoliko uzoraka. Analiziran je unaprijed odlomljeni fragment vratila (slika 71.) i dijelovi izrezanog komada prijelomne površine (Slika 48.). Kako bi se SEM analiza mogla provesti bilo je potrebno izrezati vanjski rub i dio koji se smatrao mjestom inicijalne pukotine. Tijekom SEM analize zapaženo je nekoliko specifičnosti na površini različitih dijelova. Uočene su pukotine koje propagiraju duboko u presjek analiziranog dijela, i naslage nedefiniranog oblika i kemijskog sastava. Na slikama 77. i 78. prikazane su mikropukotine uočene SEM analizom, a na slici 79. površinske naslage.



Slika 77. Pukotina na odlomljenom fragmentu



Slika 78. Pukotina na uzorku s prijelomne površine



Slika 79. Amorfne naslage na površini

SEM analizom utvrđeno je da postoji mogućnost prisutnosti mikropukotina i na drugim mjestima na analiziranom vratilu. Pojava pukotina nikada nije povoljna stvar, a posebno kada se radi o dugačkim mikroskopskim pukotinama. Pukotina prikazana na slici 78. vrlo je specifična s obzirom na to da je okomita na smjer širenja loma po prijelomnoj površini i velike je duljine u oba smjera. Naslage koje su prikazane na slici 79. zapažene su na više analiziranih dijelova i različitim površinama, vrlo sličnog strukture i izgleda te nepravilnog oblika. Za vrijeme provođenja analize nije bilo moguće odrediti kemijski sastav ili podrijetlo spomenutih naslaga.

7 ZAKLJUČAK

Na pogonskom vratilu generatora velike snage provedena je analiza oštećenja. Tijekom eksploatacije došlo je nepovratnog oštećenja tj. loma vratila, te ono više nije bilo upotrebljivo. Kako bi se pokušao utvrditi uzrok loma provedena je detaljna analiza koja je uključivala fraktografska i metalografska ispitivanja.

Na temelju provedenih eksperimentalnih istraživanja i analize literature dolazi se do sljedećih zaključaka:

- Analizom rezultata kemijskih, mikrostrukturnih i mehaničkih ispitivanja može se zaključiti da je materijal korišten za izradu vratila čelik za poboljšavanje 42CrMo4. Kvaliteta materijala nije na zadovoljavajućoj razini zbog toga što je u sastavu prisutna značajna količina uključaka od nečistoća;
- S obzirom da nema podataka o provedenim postupcima toplinske obrade, upitno je da li je dobivena mikrostruktura zapravo ciljano stanje materijala. Kako se radi o vratilu za prijenos sile i okretnog momenta očekivana ciljana mikrostruktura bi trebala biti popušteni martenzit, što u ovom slučaju nije mikrostruktura koja je zapažena tijekom analize;
- Analizom prijelomnih površina utvrđeno je da se radi o torzijskom lomu s više izvora inicijalnih pukotina, uz niža nazivna naprežanja i niskim utjecajem koncentracije naprežanja. Inicijalna mjesta loma nastala su na prijelazima presjeka i utorima po cijelom opsegu vratila. Osim pukotina nastalih na spomenutim mjestima, pojavile su se i pukotine koje nisu nastale djelovanjem umora materijala, već su uzrokovane spomenutim nečistoćama u materijalu;
- Analiza lomova i prijelomnih površina dugotrajan je i skup postupak utvrđivanja uzroka havarije u kojem je potrebno veliko iskustvo u tom području i posvećenost pri istraživanju prijelomne površine;
- Da bi se utvrdio točan uzrok pojave inicijalnog mjesta nastanka loma i detaljnije otkrio razvoj puknuća potrebna su dodatna fraktografska, metalografska i mehanička ispitivanja.

8 LITERATURA

[1] Franz M., Ćorić D. : “Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala“

[2]https://www.fose1.plymouth.ac.uk/fatiguefracture/tutorials/FailureAnalysis/Images/Fractography/Shaft_Chart.JPG (pristupljeno svibanj 3.,2021.)

[3] N.W. Sachs, P.E. : „Understanding the Surface Features of Fatigue Fractures: How They Describe the Failure Cause and the Failure History“ - Journal of Failure Analysis and Prevention, svezak 5, broj 2, godina 2005.

[4] Ponašanje materijala u eksploataciji – upute za pisanje seminarskog rada

[5] Decker K.-H.: „Elementi strojeva“

[6] Franz M: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.

[7] Kraut B.: „Strojarski priručnik 11. izdanje“

[8] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769> (pristupljeno svibanj 4., 2021.)

[9] J.H Chuang, L.W Tsay, C. Chen. : „Crack growth behaviour of heat-treated 4140 steel in air and gaseous hydrogen.“ - International Journal of Fatigue, Svezak 20, broj 7, Godina 1998., Stranice 531-536

[10] Mustafa Melih Tecer : „Effects of various heat treatment procedures on the toughness of AISI 4140 low alloy steel“ - The International Journal of Materials and Engineering Technology, Svezak 3, Godina 2020., stranice 131-149

[11] ASM Handbook: „Volume 9 Metallography and Microstructures“

9 PRILOZI

1. CD-R disk