Analiza oštećenja alata za provlačenje aluminija

Leko, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:332812

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Hrvoje Leko

Zagreb, 2018 godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing. Hrvoje Leko

Zagreb, 2018. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na pomoći pri pisanju rada. Također zahvaljujem se Ivanu Vovku na pomoći pri analizi uzoraka u Laboratoriju za materijalografiju i poduzeću „FeAl“ d. o. o. Široki Brijeg na ustupljenom materijalu za izradu rada.

Hrvoje Leko

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:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **HRVOJE LEKO** Mat. br.: 0035196734

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza oštećenja alata za provlačenje aluminija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fracture analysis of drawing die for aluminium**

Opis zadatka:

Provlačenje je tehnološki postupak proizvodnje šipki, žica i sličnih proizvoda ujednačene geometrije poprečnog presjeka i vrlo je čest kod obrade aluminija i aluminijskih legura. Problem kod tog postupka se javlja u trošenju alata za provlačenje što povlači za sobom gubitak dimenzija i potrebu za zamjenom alata.
U radu je potrebno analizirati realan uzorak alata za provlačenje aluminija koji je uslijed trošenja zamijenjen. Potrebno je provesti kompletna laboratorijska ispitivanja materijala tog alata s ciljem utvrđivanja njegove strukture i osnovnih svojstva.
Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja te znanja stečenog tijekom studiranja potrebno je donijeti zaključke o mehanizmima trošenja prisutnima u tom tribo-sustavu, zatim o uzrocima trošenja alata te mjerama koje bi se mogle poduzeti kako bi se produlji njegov životni vijek.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1.UVOD 1
2. PROVLAČENJE (EKSTRUDIRANJE) ALUMINIJA 2
3. ALATI ZA PROVLAČENJE 5
3.1. KONSTRUKCIJA ALATA 6
3.2. PROIZVODNJA I KOREKCIJA ALATA ZA PROVLAČENJE 8
3.3. IZBOR MATERIJALA I TOPLINSKA OBRADA ALATA 9
3.4. TROŠENJE ALATA ZA PROVLAČENJE 10
4. EKSPERIMENTALNI DIO 14
4.1. MAKROSKOPSKA ANALIZA 17
4.2. PRIPREMA UZORAKA ZA METALOGRAFSKU ANALIZU 20
4.3. ANALIZA MIKROSTRUKTURE UZORAKA 25
5. ZAKLJUČAK 50
LITERATURA 51

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni princip provlačenja……..2
Slika 2. Metoda trupac na trupac……3
Slika 3. Postupak indirektnog provlačenja……..3
Slika 4. Alat za provlačenje aluminija……5
Slika 5. Radijalni raspored otvora alata……..7
Slika 6. Ravni raspored otvora alata……...7
Slika 7. Prikaz trošenja alata……11
Slika 8. Ovisnost trošenja o broju ciklusa za različite duljine trupca……...11
Slika 9. Ovisnost trošenja o broju ciklusa za različite brzine kretanja klipa……12
Slika 10. Promjena oblika profila uslijed trošenja……12
Slika 11. Alat za provlačenje ……...15
Slika 12. Alat za provlačenje ……...15
Slika 13. Alat za provlačenje……16
Slika 14. Oštećeni vrh 1……17
Slika 15. Oštećeni vrh 2……18
Slika 16. Oštećeni vrh 2……18
Slika 17. Naljepljivanje aluminija na alat……19
Slika 18. Princip rezanja vodenim mlazom……..20
Slika 19. Mjesta izrezivanja uzoraka……21
Slika 20. Uzorak 1……22
Slika 21. Uzorak 2……22
Slika 22. Uzorak 2……23
Slika 23. Uzorci uliveni u polimernu masu……..24
Slika 24. Uzorak 1-jezgra……25
Slika 25. Uzorak 1-jezgra……26
Slika 26. Uzorak 1-prijelomna površina……..27
Slika 27. Uzorak 1-prijelomna površina……..27
Slika 28. Uzorak 1-prijelomna površina……..28
Slika 29. Uzorak 1-nitrirana površina……..29
Slika 30. Uzorak 1- nitrirana površina……29
Slika 31. Uzorak 2- nitrirana površina……30

Slika 32. Uzorak 2- nitrirana površina…….31
Slika 33. Uzorak 2-jezgra ……32
Slika 34. Uzorak 2-jezgra ……32
Slika 35. Uzorak 2- nitrirana površina…….33
Slika 36. Uzorak 3- nitrirana površina…….34
Slika 37. Uzorak 3- nitrirana površina…….34
Slika 38. Uzorak 3-jezgra…….35
Slika 39. Uzorak 3-jezgra ……36
Slika 40. Princip određivanja dubine nitriranog sloja……..37
Slika 41. Ovisnost tvrdoće o udaljenosti od ruba…….37
Slika 42. Prijelomna površina 1, SEM…….38
Slika 43. Prijelomna površina 2, SEM ……39
Slika 44. Prijelomna površina 3, SEM ……39
Slika 45. Prijelomna površina 4, SEM ……40
Slika 46. Jezgra uzorka 1, SEM ……..41
Slika 47. Moguća greška, SEM ……...42
Slika 48. Jezgra uzorka 1 bez uočenih mogućih grešaka, SEM ……..43
Slika 49. Površina uzorka 1, SEM……44
Slika 50. Površina uzorka 1, SEM ……...44
Slika 51. Površina uzorka 1, SEM ……...45
Slika 52. Površina uzorka 1, SEM ……...45
Slika 53. Jezgra uzorka 2, SEM ……...46
Slika 54. Jezgra uzorka 2, SEM ……...47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperature prešanja za različite materijale……..……..4

Tablica 2. Kemijski sastav čelika X 38 CrMoV 51……..14

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika X 38 CrMoV 51……14

Tablica 4. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće……...49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C	mm	Razmak između otvora alata i stijenke komore
D	mm	Razmak između otvora alata
NhtHV0,5	m	Efektivna dubina nitriranog sloja
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
F	N	Sila
Rm	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
t	°C	Temperatura
p	Pa	Tlak
λ	W/mK	Toplinska provodnost
HV	HV	Tvrdoća mjerena Vickers metodi
HRC	HRC	Tvrdoća mjerena Rockwell C metodom

SAŽETAK

Na alatu za provlačenje aluminija došlo je do loma u tijeku proizvodnje. Dva vrha alata su oštećena, od čega je jedan djelomično oštećen, a drugi u potpunosti. Alat je izrađen od alatnog čelika za topli rad. Analizom prijelomnih površina kao i osnovnog materijala uzorka potrebno je definirati uzrok loma, i dati preporuke za izbjegavanje lomova u budućnosti. Za utvrđivanje uzroka potrebno je provesti makroskopsku analizu prijelomnih površina, mikrsokopsku analizu prijelomne površine, osnovnog materijala i neoštećenih površine, izmjeriti mikrotvrdoću uzorka, odrediti dubinu nitriranog sloja te izmjeriti tvrdoću samog alata.

Ključne riječi: X38CrMoV51 čelik, provlačenje aluminija, lom, analiza uzoraka

SUMMARY

In the process of aluminum extrusion a fracture appeared in the tool which was made out of hot working tool steel. Two tips of the tool are damaged, of which one is partially damaged and other is damaged completly It was necessary to find the cause of the fracture by analysing the fracture surface as well as the basic material and sugest procedures to avoid future fractures. To determine cause of fracture it is nessesary to carry out macroscopic analysis of fracture surfaces, microscopic analysis of fracture surfaces, core material and undamaged surfaces, measure microhardness of sample and to measure hardness of tool.

Keywords: X38CrMoV51 steel. Aluminium extrusion, fracture, sample analysis

1.UVOD

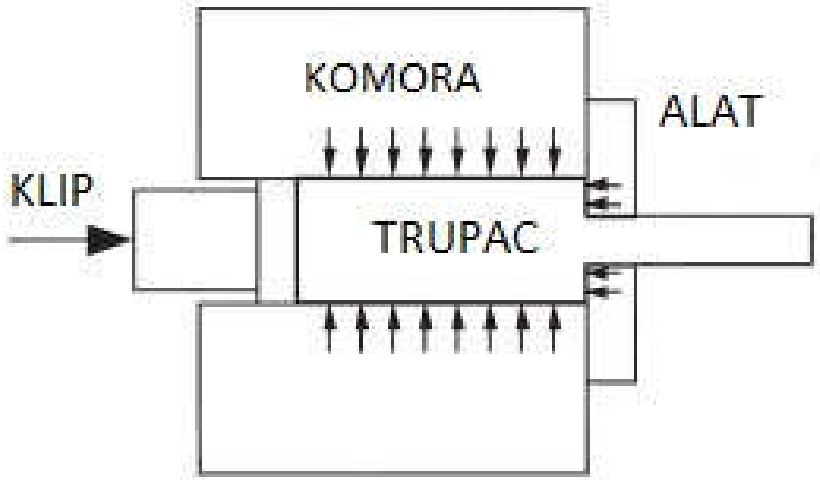
U ovom radu potrebno je analizirati uzroke trošenja i loma alata za provlačenje aluminija. Alat je izbačen iz upotrebe radi oštećenja 2 vrha od kojih je jedan djelomično oštećen, dok je drugi i potpunosti slomljen. Iz tvrtke u kojoj je alat bio u upotrebi preuzeti su podaci o materijalu i tvrdoći alata. Materijal alata je X38CrMoV51, a tvrdoća je 48HRC +/- 2HRC. Korištenjem laboratorijskih metoda analize strukture i svojstva materijala potrebno je pronaći uzroke oštećenja alata.

Analiza uključuje vizualni pregled, svjetlosnu i elektronsku mikroskopiju te mjerenje tvrdoće i mikrotvrdoće materijala alata.

Nadalje po pronalasku uzroka loma potrebno je dati preporuke za daljnja postupanja s alatom kao i moguće promjene postupka proizvodnje i održavanja alata kako bi se izbjegli budući lomovi.

2. PROVLAČENJE (EKSTRUDIRANJE) ALUMINIJA

Ekstrudiranje ili provlačenje je proces u kojemu se sirovac (trupac) plastično deformira i dovodi u stanje tečenja te prolazi kroz otvor u alatu (matrici) koji je manjeg poprečnog presjeka nego što je izvorni trupac [1]. Na slici 1 prikazan je osnovni princip provlačenja materijala.



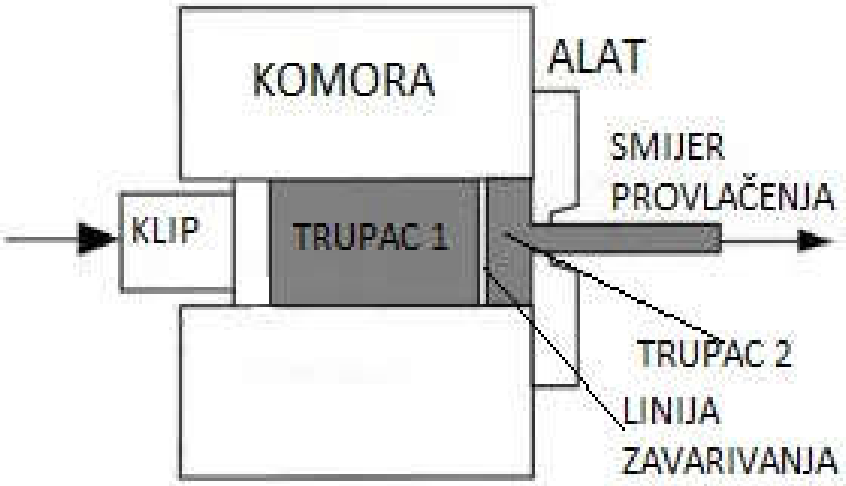
Slika 1. Osnovni princip provlačenja [1]

Provlačenje je neposredni tlačni proces obrade. Neposredne tlačne sile javljaju se kao reaktivna sila kontakta trupca sa zidovima komore, klipa i matrice (alata). Tako nastale tlačne sile tjeraju materijal da počinje teći te prolazi kroz otvore matrice i postupno dobiva željeni oblik i dimenzije [1].

Dvije najčešće korištene vrste provlačenja u aluminijskoj industriji su direktno i indirektno. Podjela se odnosi na smjer tečenja materijala u odnosu na smjer kretanja klipa [1]. Najčešće korištena vrsta je direktno provlačenje. Trupac se postavlja u komoru i kretanjem klipa tlači se trupac. Smjer kretanja klipa je isti kao i smjer provlačenja. Tijekom procesa trupac se kliže uz zidove komore što rezultira relativno visokim trenjem a samim time i povećanju tlaka prešanja trupca [1].

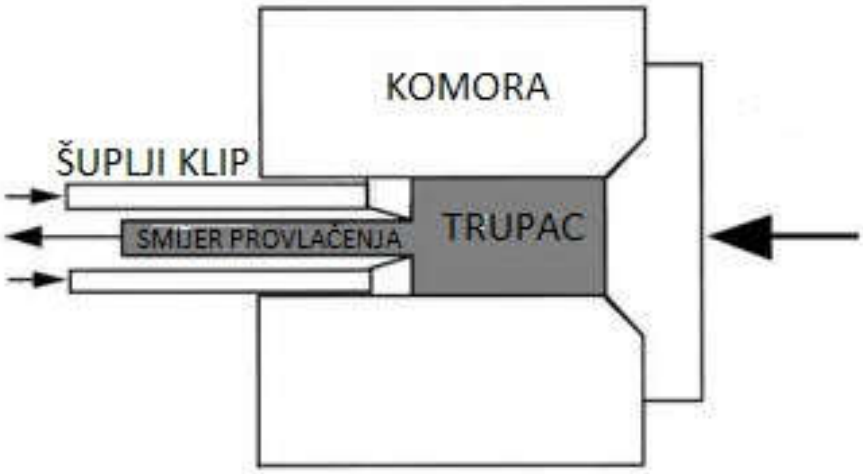
Da bi se osigurala kontinuirana proizvodnja dijelova potrebno je povezati proces provlačenja kada prelazimo s jednog trupca, koji je većim dijelom prerađen, i drugog trupca koji je cjelovit, potrebno je spojiti ta dva trupca unutar alatnog stroja. To se radi metodom trupac na

trupac. Metoda je pogodna za one legure koje su zavarljive pod temperaturom i tlakovima unutar alatnog stroja. Kada je jedan trupac pri kraju u stroj se ubacuje drugi te se klip kreće u smjeru obrade te tako zavaruje trupac za trupac i osigurava neprekidnost proizvodnje. Na ovaj način teoretski je moguće dobiti proizvode neograničene duljine. Na slici 2 prikazana je shema metode trupac na trupac [1].



Slika 2. Metoda trupac na trupac [1]

Kod indirektnog provlačenja matrica se nalazi na kraju šupljeg klipa. Smjer provlačenja suprotan je smjeru kretanja klipa. Zbog nedostatka trenja između trupca i stjenki komore manja je sila potrebna za prešanje. Na slici 3 prikazan je postupak indirektnog provlačenja [1].



Slika 3. Postupak indirektnog provlačenja [1]

Prema temperaturi obrade postupke provlačenja dijelimo na provlačenje u toplom i u hladnom stanju.

Kod provlačenja u toplom stanju trupac se zagrijava na određenu temperaturu kako bi se olakšalo protiskivanje materijala kroz matricu. Većina proizvoda koji se proizvode u toplom stanju obavlja se na horizontalnim hidrauličkim prešama koje proizvode pritiske od 30MPa do 700MPa, te je potrebno podmazivanje. Za podmazivanje se najčešće koristi mineralno ulje ili grafit za niže temperature ili staklena prašina za više [2]. Temperature prešanja za različite materijale prikazane su u tablici 1. Najveći nedostatak ove metode je visoka cijena nabavke strojeva kao i visoki pogonski troškovi i troškovi održavanja [1].

Tablica 1. Temperature prešanja za različite materijale [2]

Materijal	**Temperatura, °C**
Magnezij	350-450
Aluminij	350-500
Bakar	600-1100
Čelik	1200-1300
Titanij	700-2100(1300-2100)
Nikal	1000-1200
Vatrostalne Legure	Do 2000

Provlačenja u hladnom stanju odvija se na sobnoj temperaturi ili blizu nje. Prednosti su veća čvrstoća gotovog proizvoda, izostanak oksidacije, uže tolerancije, veće brzine provlačenja. Materijali koji se prerađuju ovim postupkom su: olovo, aluminij, kositar, čelik, titanij, berilij.

3. ALATI ZA PROVLAČENJE

Najvažniji čimbenik u procesu ekstruzije je alat (matrica). On omogućava da se iz sirovca dobije gotov proizvod. Za uspjeh na tržištu potrebno je imati dovoljnu brzinu proizvodnje, povoljnu cijenu i zadovoljavajuću kvalitetu konačnog proizvoda. Svi ti faktori uvelike ovise o alatu. Zajedno s porastom potražnje za aluminijskim profilima, koje ponajviše diktiraju građevinska, automobilska i zrakoplovna industrija, potrebno je povećati proizvodnost i kvalitetu proizvoda, te ostvariti tražene tolerancije, koje ove grane industrije veoma usko diktiraju [1].

Karakteristike procesa provlačenja opisuju 3 glavna faktora, a to su brzina ekstruzije, količina odbačenog materijala i životni vijek alata. Cilj svakog proizvodnog procesa je usklađivanje parametara da bi sam proizvodni proces bio što efikasniji i isplativiji. Takva optimizacija je moguća korištenjem novih tehnologija u izradi alata, korištenjem visokokvalitetnih čelika i postupcima inženjerstva površine u cilju poboljšavanja svojstava samoga alata. Fleksibilnost, pouzdanost i kvaliteta najvažniji su zahtjevi koje moraju ispuniti proizvođači alata. Sama proizvodnja alata uključuje kompleksnu sinergiju konstrukcije, koristeći CAD sustave i visokotehnoloških procesa proizvodnje, CNC strojeve i EDM procese [1]. Na slici 4 prikazan je alat za provlačenje aluminija.

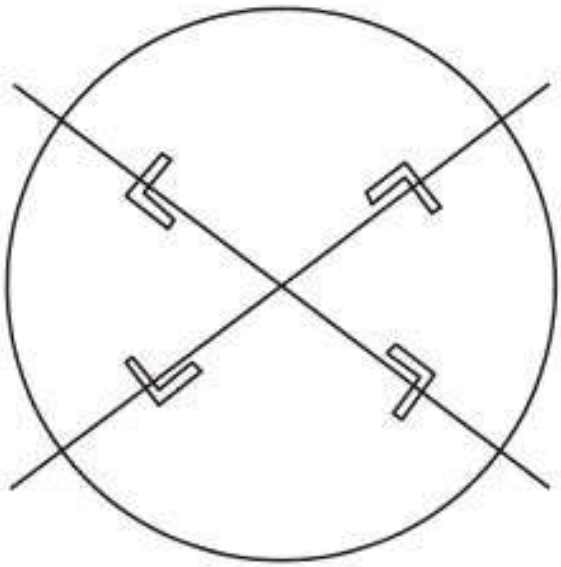
Slika 4. Alat za provlačenje aluminija [3]

3.1. KONSTRUKCIJA ALATA

Konstrukcija i izrada alata za izvlačenje najvažniji su i naježi koraci cijelog procesa provlačenja. Sama konstrukcija uvjetovana je mnogim čimbenicima uključujući procedure uporabe i održavanja same preše, oblik i tolerancije profila koji se obrađuje i svojstva legure koja se obrađuje. Zbog potrebe za iznimnim vještinama i snalažljivošću samog konstruktora alata potrebne su godine iskustva konstruktora da bi se povećala kvaliteta samih alata ali i konačnih proizvoda. Zahtjevi za kompleksnost oblika profila, debljine stjenki i kvalitetu površine se povećavaju s vremenom te samim time dolazi do novih problema za konstruktore koje trebaju rješavati. Da bi se dostigla optimalna proizvodnost kao i tražena svojstva konačnog proizvoda potrebna je uska suradnja između konstruktora, proizvođača, operatera na alatnom stroju i korektora alata [1].

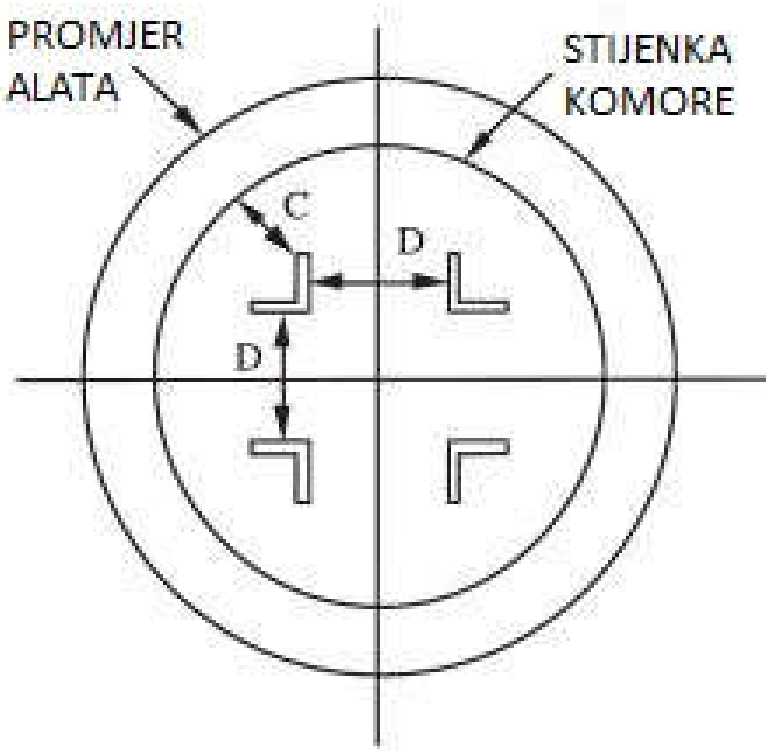
Svi procesi provlačenja trebaju ispuniti tri osnovna cilja. Ti ciljevi su omogućavanje jednostavnog protoka metala, dimenzijska stabilnost i kvalitetna površina završnog proizvoda. Sami ciljevi su relativno jednostavni, ali mnogi faktori uključujući konstrukciju alata i korekciju, prilagođavanje opreme za obradu, izbor legure, temperatura obrade, podmazivanje i brzinu obrade utječu na konačni proizvod. Bitni faktori za konstrukciju su još i deformacija alata pod tlakom obrade i toplinske deformacije na temperaturama obrade materijala. Ključni čimbenici koje trebamo uzeti u razmatranje prilikom konstrukcija alata su broj otvora u alatu, položaji otvora u alatu u odnosu na osi trupca, orijentacija otvora u odnosu na sustav prihvata, konačne dimenzije otvora nakon što se uračunaju promjene dimenzija usred promjena temperature s radne na sobnu i optimizacija alata da se postigne željena proizvodnost [1].

Geometrijski raspored samoga alata određuju razmak između otvora alata i stjenke komore (C), razmak između otvora (D), balansiranje protoka metala kako bi se izbjegla deformacija konačnog proizvoda, olakšavanje konstrukcije i proizvodnje alata i izbjegavanje preklapanja i kontakta izvučenih profila na izlazu iz alata. Minimalni razmak između otvora alata i stjenke komore potreban je kako bi se izbjegao tok oksida s površine trupca u tok proizvodnje profila. Također minimalna udaljenost između otvora u alatu s više otvora potrebna je radi čvrstoće samoga alata, da bi se izbjegao lom uslijed tlaka izvlačenja. Postoje dvije glavne raspodjele otvora, ravni i radijalni. Prednosti kod radijalnog rasporeda otvora su jednoličan raspored otvora, ujednačen tok metala i jednostavna korekcija alata, dok su glavni nedostatci uvijanje izvučenih profila i teže rukovanje na izlazu iz alata [1]. Na slici 5 prikazan je radijalni raspored otvora alata.



Slika 5. Radijalni raspored otvora alata [1]

Prednosti ravnog rasporeda su lakoća rukovanja obratka na izlazu iz alata i veća produktivnost, dok su glavni nedostaci teža korekcija i proizvodnja. U proizvodnji aluminijskih profila koristi se ravni raspored koji je prikazan na slici 6 [1].



Slika 6. Ravni raspored otvora alata [1]

3.2. PROIZVODNJA I KOREKCIJA ALATA ZA PROVLAČENJE

Postupak proizvodnje počinje s profilom koji se želi proizvoditi. Iz tehničke dokumentacije i oblika profila oblikuju se otvori u alatu da bi se dobio željeni oblik profila. Zahtjevi za alat su ekonomičnost i produktivnost s jedne strane i kvaliteta i pouzdanost s druge strane. Proizvodnja alata modernim tehnologijama obrade metala omogućuje da se ova dva seta zahtjeva zadovolje u što većem omjeru [1].

Nakon što je alat proizveden šalje se u pogon na probni rad. Iako je upotreba modernih tehnologija poput CAD/CAM sustava za konstrukciju i CNC alata za izradu smanjila mogućnost pogrešaka ipak je potreban probni rad alata kako bi se ustanovilo ima li kakvih pogrešaka u materijalu ili konstrukciji alata. Ukoliko je profil koji iziđe iz alata zadovoljavajućeg oblika i kvalitete površine alat nastavlja daljnju proizvodnju. Ukoliko se pojave greške potrebno je provesti korekciju alata. Razlozi za korekciju mogu biti razni, na primjer nepravilan tok metala, dimenzijske varijacije, kvaliteta površina, nepravilan izlazak iz alata i slično. Također potreba za korekcijama nije nužno vezana samo za nove alate, već su pogreške moguće i kod alata koji su već u upotrebi. Trošenje ili lomovi mogu uzrokovati nepravilnosti u profilu koje je potrebno korigirati. Korekcija zahtjeva veliko iskustvo radnika. Postoji više načina korekcije alata, a svi ovise o iskustvu radnika. Nadalje važno je da radnik na korekciji bude prisutan prilikom testiranja i također da ima u posjedu sve adekvatne podatke o preši, materijalu trupca, parametrima alata i postupka kako bi kvalitetno obavio posao. Za samu korekciju potrebno je uzeti u obzir niz parametara. Ti parametri su: radna temperatura alata, temperatura trupca, brzina obrade, usklađenost samog alatnog stroja (preše), pomak seta alata te vrsta i prisutnost lubrikanta [1].

3.3. IZBOR MATERIJALA I TOPLINSKA OBRADA ALATA

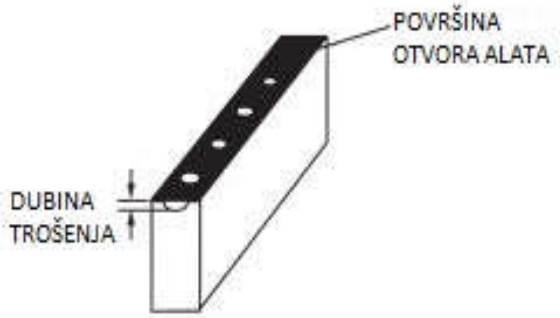
Kritična faza u konstruiranju alata za izvlačenje aluminija je izbor materijala. Zbog toga što se sama obrada trupca provodi na višim temperaturama od sobne, najčešće u rasponu od 350°C do 500°C, potrebno je koristiti alatne čelike za topli rad. Ponašanje samoga alata ograničeno je ponašanjem materijala na povišenim temperaturama kao i tipovima trošenja i loma. Najčešći razlozi za prijevremeno odbacivanje alata su plastična deformacija, žilavi i krhki lom te trošenje. Da bi se izbjegli navedeni problemi potrebno je da materijal od kojega je izrađen alat ima visoku tvrdoću i čvrstoću na visokim temperaturama, dobru otpornost na trošenje i visoku žilavost [1].

Kvaliteta površine kod izvučenih proizvoda jedno je od najbitnijih svojstava proizvoda. Ponajviše ovisi o stanju površine otvora alata koji se može oštetiti uslijed trošenja. Najopasniji mehanizam trošenja je adhezivno trošenje. Da bi se spriječilo trošenje potrebno je provesti toplinsku obradu alata, posebice toplinsku obradu površine otvora u cilju smanjenja trošenja. Koriste se razne metode toplinske obrade i inženjerstva površine uključujući nitriranje, nitrokarburiranje, CVD prevlačenja i PVD prevlačenja. Toplinska obrada površine pomaže pri smanjenju trenja i trošenja same površine otvora u alatu i tako produžava životni vijek alata. U eksperimentalnim analizama dokazano je da tehnike prevlačenja površine TiC, TiN i VC slojem postižu znatno manje koeficijente trenja, a samim time i manje trošenje u odnosu na nitrirane dijelove te tako produžuju znatno životni vijek alata [1].

3.4. TROŠENJE ALATA ZA PROVLAČENJE

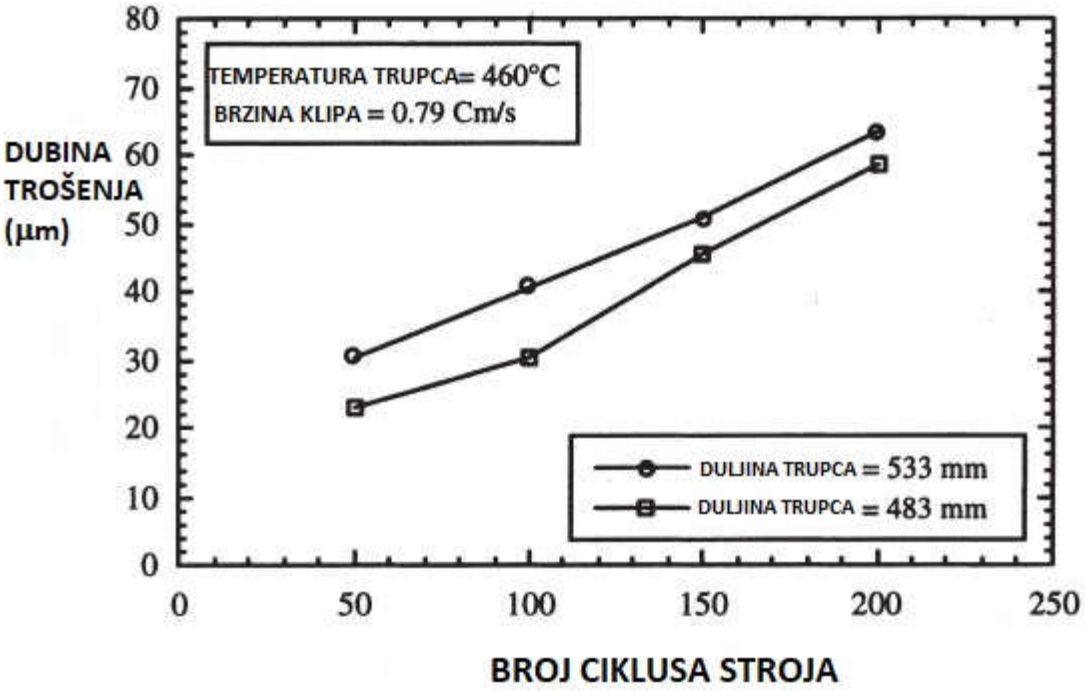
Trenje prilikom izvlačenja i trošenja otvora alata za izvlačenje ponajprije ovise o radnoj temperaturi alata, brzini izvlačenja, obliku profila, duljini i stanju površine otvora alata, materijalu alata i materijalu koji se izvlači. Temperatura obrade ponajviše utječe na trenje između otvora alata i obrađivanog metala, a samim time i na intenzitet trošenja alata. Samo kretanje metala kroz otvor alata proizvodi određenu količinu topline koja pospješuje trošenje i samim time skraćuje radni vijek alata. Također niske temperature obrade utječu na lošije tečenje metala i samim time potrebu za većom silom kojom klip opterećuje trupac što može dovesti do loma dijelova alata [1].

Samo trošenje definira se kao gubitak materijala s površine otvora alata za izvlačenje. Trošenje je bitno u tehnološkom i ekonomskom smislu jer mijenja tok metala, oblik otvora i sam način interakcije otvora alata i obrađivanog metala. Također utječe i na oblik, veličinu i kvalitetu površine profila koji se obrađuje. Trošenje utječe na stanje površine alata i oštećuje površinu otvora kuda metal prolazi i dobiva konačni oblik te je stoga nepoželjno. Kod direktnog izvlačenja procesi trenja i trošenja su još kompleksniji zbog visokih tlakova i relativnih brzina kretanja između trupca i stjenki komore koji skupa djeluju s adhezivnim i abrazivnim trošenjem te tako izazivaju iznenadne temperaturne promjene i dugotrajna izlaganja određenih područja visokim temperaturama. Prilikom izvlačenja dugih dijelova temperatura na površini alata može doseći temperaturu popuštanja alatnog čelika te može doći do deformacija i gubitka dimenzijske stabilnosti. Visoke temperature također ubrzavaju abrazivno trošenje koje bi pri uvjetima sobne temperature bilo zanemarivo. Dodatni problem je adhezivno trošenje. Pošto aluminij i čelik imaju veliku tendenciju adhezije stvara se adhezivni sloj na površini otvora alata. Za razvoj adhezivnog sloja ključan je niz faktora od kojih su najvažniji brzina izvlačenja, temperatura na alatu nastala samim izvlačenjem, oblik profila, površinska hrapavost otvora alata i tvrdoća alata. Temperatura nastala izvlačenjem i brzina izvlačenja izravno su povezani. Porastom brzine izvlačenja dolazi do povećanja temperature na alatu. Porastom temperature dolazi do povećanja opasnosti od nastanka adhezivnog sloja [1]. Na slici 7 prikazan je princip trošenja otvora alata.



Slika 7. Prikaz trošenja alata [1]

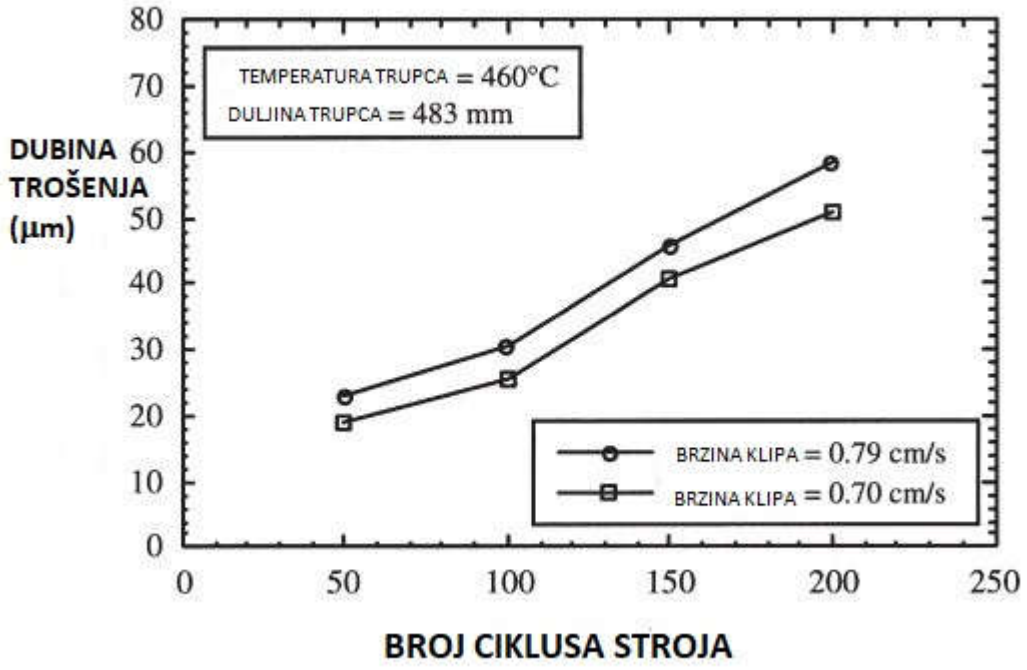
Ispitivanja autora članka dovela su u vezu s trošenjem duljinu trupaca i brzinu obrade. Na slici 8 prikazan je ovisnost trošenja o broju ciklusa stroja za dvije duljine trupca. Jedan ciklus predstavlja kontinuirano kretanje klipa naprijed u radu te povlačenje klipa u početni položaj radi umetanja sljedećeg trupca.



Slika 8. Ovisnost trošenja o broju ciklusa za različite duljine trupca [1]

Iz slike 8 vidljivo je da je trošenje povećano kod izvlačenja dugih dijelova. Razlog tome je viša temperatura koja se razvija na kontaktu između otvora alata i materijala koji se obrađuje jer prilikom izvlačenja duljeg dijela pri istoj brzini obrade dolazi do vremenski duljeg kontakta i time do povećanja temperature.

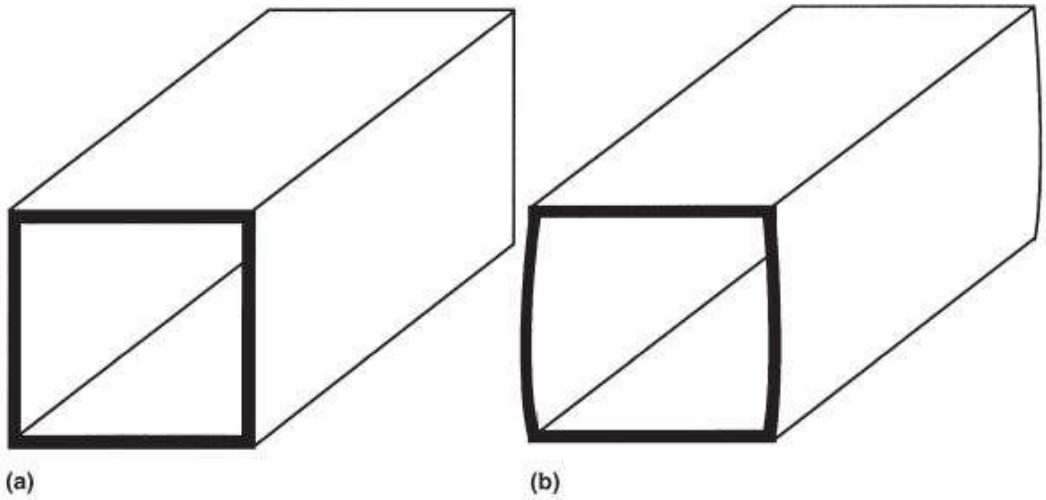
Na slici 9 prikazana je trošenja i broja ciklusa za dvije različite brzine kretanja klipa.



Slika 9. Ovisnost trošenja o broju ciklusa za različite brzine kretanja klipa [1]

Veća brzina kretanja klipa dovodi do veće brzine kretanja materijala kroz alata i samom time do povećanja temperature na kontaktu i povećanja trošenja alata.

Na slici 10 prikazan je promjena oblika izvučenog profila uslijed trošenja alata.



Slika 10. Promjena oblika profila uslijed trošenja, (a-profil nepotrošenog alata, b-profil potrošenog alata) [1]

Na dijelu slike pod a vidljiv je željeni izgled profila nakon izlaska iz alata, dok je na dijelu b prikazan oblik koji se dobiva prolaskom trupca kroz potrošeni alat. Upravo u promjeni oblika i dimenzija konačnog proizvoda leži najveći problem trošenja alata za izvlačenje. Čak i promjene koje nisu vidljive golim okom mogu uzrokovati da sami profil nije zadovoljavajućih svojstava. Ponajviše se takve greške vide prilikom proizvodnje profila za prozore i vrata gdje je potrebne točne dimenzije kako bi otvor pravilno brtvio i bio zadovoljavajućih svojstava u vidu očuvanja toplinske energije.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu analiziran je uzrok loma alata za provlačenje aluminija. Naime sam alat je zakazao nakon 5 ciklusa uporabe, što je za standarde tvrtke koja obrađuje aluminij i koja je koristila taj alat prerano. Alat je izrađen od X38CrMoV51 alatnog čelika za topli rad, nitrirane površine, a zahtjevi za tvrdoću su 48HRC +/- 2HRC.

X38CrMoV51 čelik je alatni čelik za topli rad s visokom žilavošću, a može postići tvrdoću od 50HRC do 56HRC. Čelik je otporan na trošenje i visoke toplinske provodnosti. Namijenjen je za alate koji su izloženi visokim temperaturama i tlakovima, kao što je u industriji aluminija [4]. U tablici 2 prikazan je kemijski sastav čelika X38CrMoV51.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika X38CrMoV51 [4]

Kemijski element	**Udio,%**
Ugljik, C	0,38
Krom, Cr	5,3
Željezo, Fe	ostalo
Mangan, Mn	0,4
Molibden, Mo	1,2
Silicij, Si	1
Vanadij, V	0,4

U tablici 3 prikazana su mehanička svojstva čelika X38CrMoV51.

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika X38CrMoV51 [4]

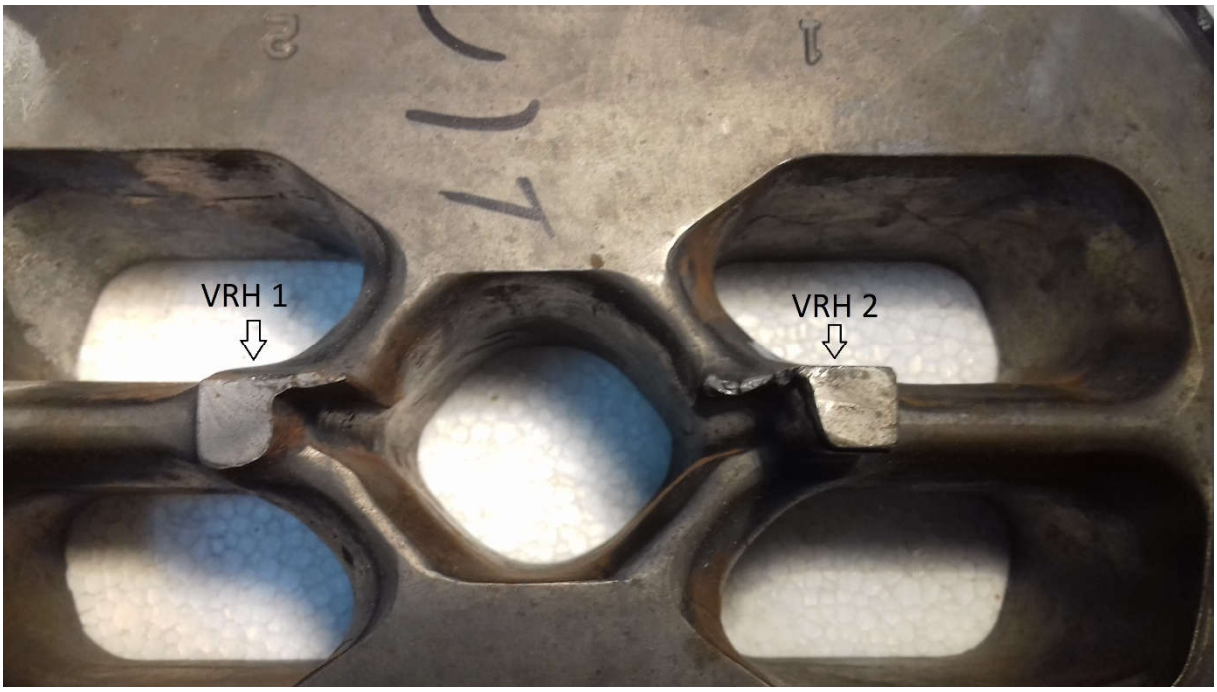
Mehanička svojstva	**Tvrdoća, HRC**	**Vlačna čvrstoća, N/mm^2**	**Modul elastičnosti pri 500°C, N/mm^2**	**Toplinska provodnost pri 200°C, W/mK**
	50-56	780	176000[5]	27

Alat je bio u upotrebi u tvrtki FeAl d.o.o. Široki Brijeg. Na slikama 11, 12 i 13 prikazan je alat za provlačenje aluminija.

.

Slika 11. Alat za provlačenje

Slika 12. Alat za provlačenje

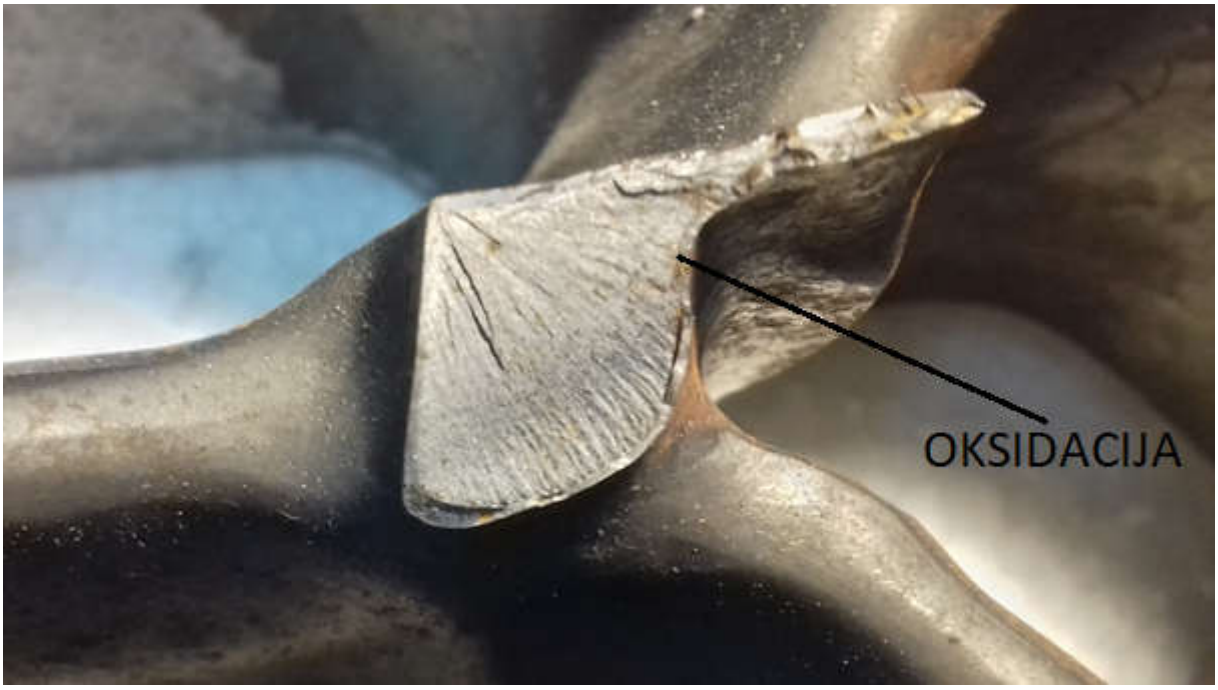


Slika 13. Alat za provlačenje

Na alatu su vidljiva oštećenja dva vrha, od kojih je jedan djelomično oštećen dok je drugi u potpunosti odlomljen. Također vidljivi su određeni tragovi naljepljivanja aluminija na stjenkama otvora.

4.1. MAKROSKOPSKA ANALIZA

Prvi korak u pronalasku uzroka loma je makroskopska analiza oštećenja. Na slici 14, prikazano je oštećenje vrha 1.



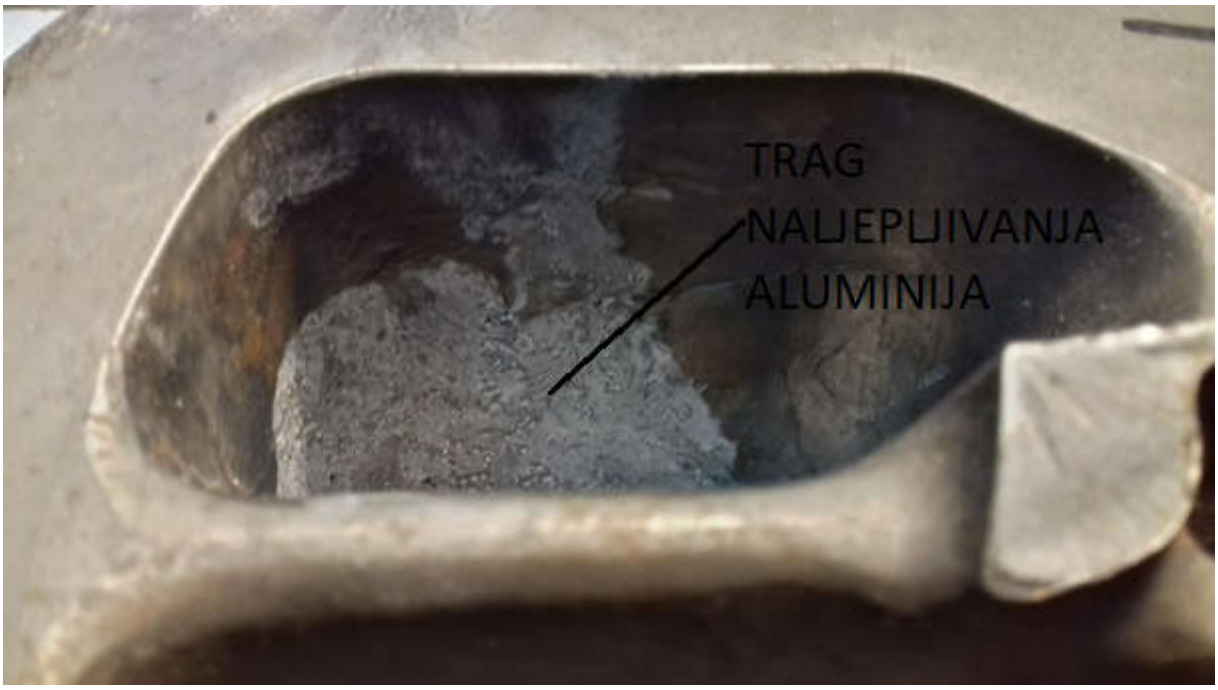
Slika 14. Oštećeni vrh 1

Vizualnim pregledom uočavaju se tragovi oksidacije na prijelomnoj površini. Nisu uočeni karakteristični tragovi koji bi ukazivali na umor materijala. Na slikama 15 i 16 prikazan je oštećeni vrh 2.

Slika 15. Oštećeni vrh 2

Slika 16. Oštećeni vrh 2

Na vrhu 2, koji je djelomično oštećen, nisu uočeni nikakvi tragovi karakteristični za umor materijala kao ni tragovi oksidacije. Na slici 17 prikazan je trag naljepljivanja aluminija na stjenke alata.



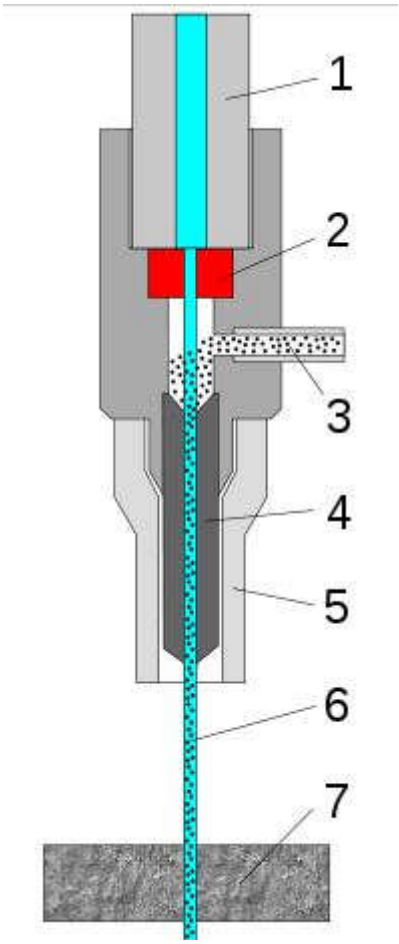
Slika 17. Naljepljivanje aluminija na alat

Makroskopskom analizom nisu uočeni tragovi trošenja na stjenkama alata.

4.2. PRIPREMA UZORAKA ZA METALOGRAFSKU ANALIZU

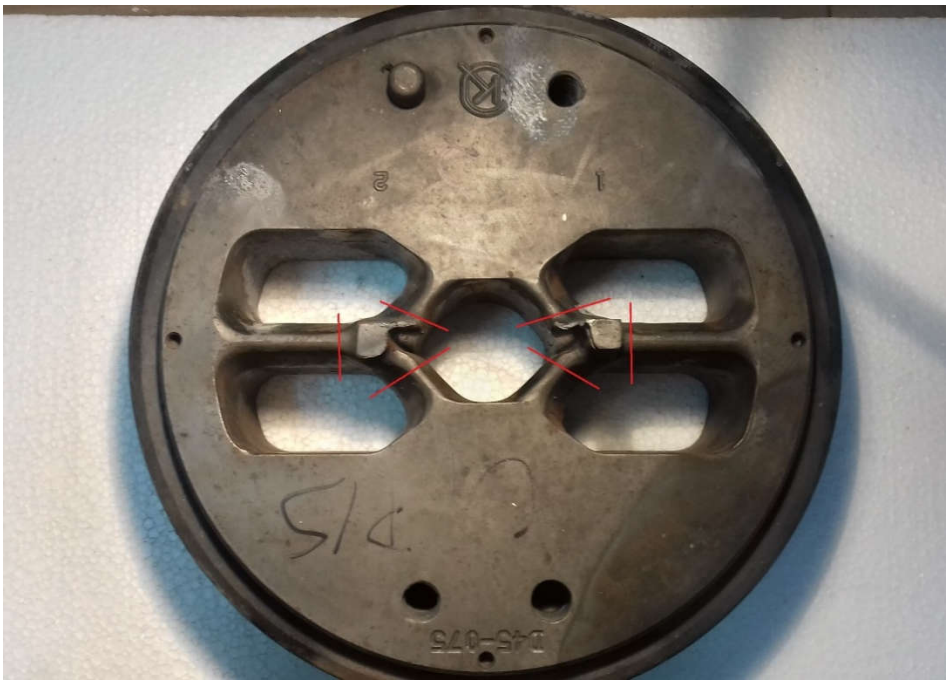
S obzirom da je alat prevelikih dimenzija za izravnu analizu potrebno je bilo izrezati uzorke kritičnih mjesta loma. Primarno rezanje obavljeno je rezanjem mlazom vode.

Rezanje vodenim mlazom spada u nestandardne postupke obrade metala odvajanjem čestica. Rezanje se ostvaruje abrazivnim vodenim mlazom koji je mješavina vode i abrazivnih čestica pod visokim tlakom. Princip nastanka reza je erozija na kontaktu vodenog mlaza i obrađivanog metala [6]. Ovim postupkom moguće je rezati metale, tvrde metale, staklo, kamen, polimerne materijale, drvo i druge materijale. Rezanje vodenim mlazom ne zagrijava materijal, što je posebno korisno za čelike koji su namijenjeni za toplinsku obradu. Također je bitno prilikom izrade uzoraka za metalografsku analizu jer nema zagrijavanja koje može prouzročiti strukturne promjene u uzorku i samim time dovesti do krivih zaključaka analize. Zbog mogućnosti automatizacije stroja moguće je dobivanje kompleksnih oblika s dobrom kvalitetom površine reza [7]. Na slici 18 prikazan je princip rezanja vodenim mlazom.



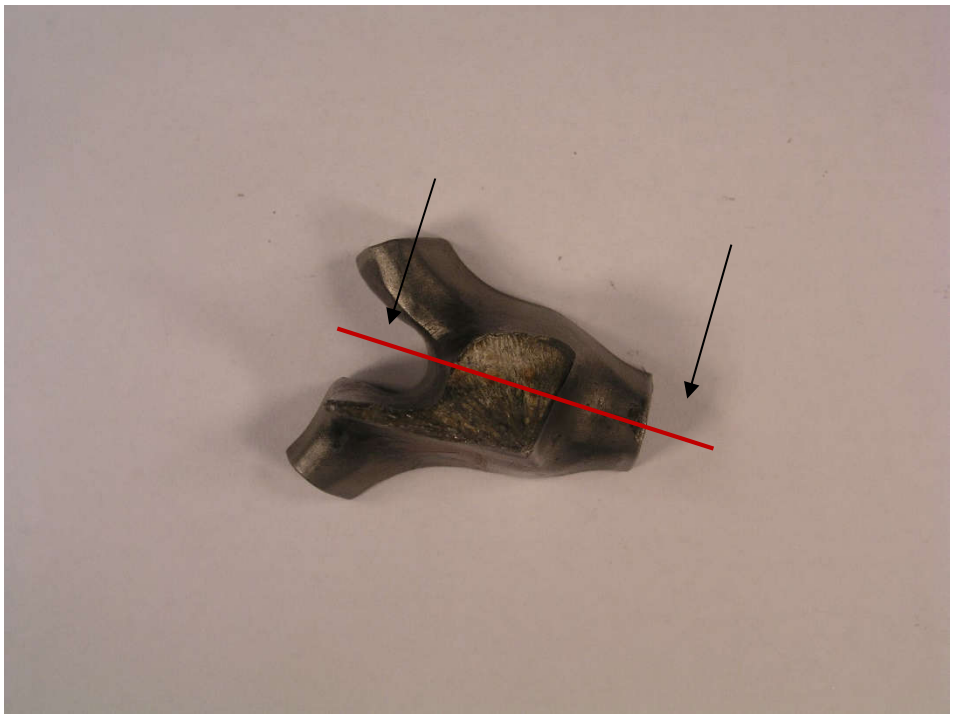
Slika 18. Princip rezanja vodenim mlazom [8]

Dijelovi sustava su numerirani, a pod 1 je ulaz vode pod visokim tlakom u rasponu od 280MPa do 690MPa, pod 2 se nalazi sapnica od safira, pod 3 abrazivni materijal, 4 cijev za miješanje, 5 je vodilica, 6 je vodeni mlaz a pod 7 je obradak. Na slici 19 prikazana su mjesta izrezivanja uzorka vodenim mlazom crvenim linijama.



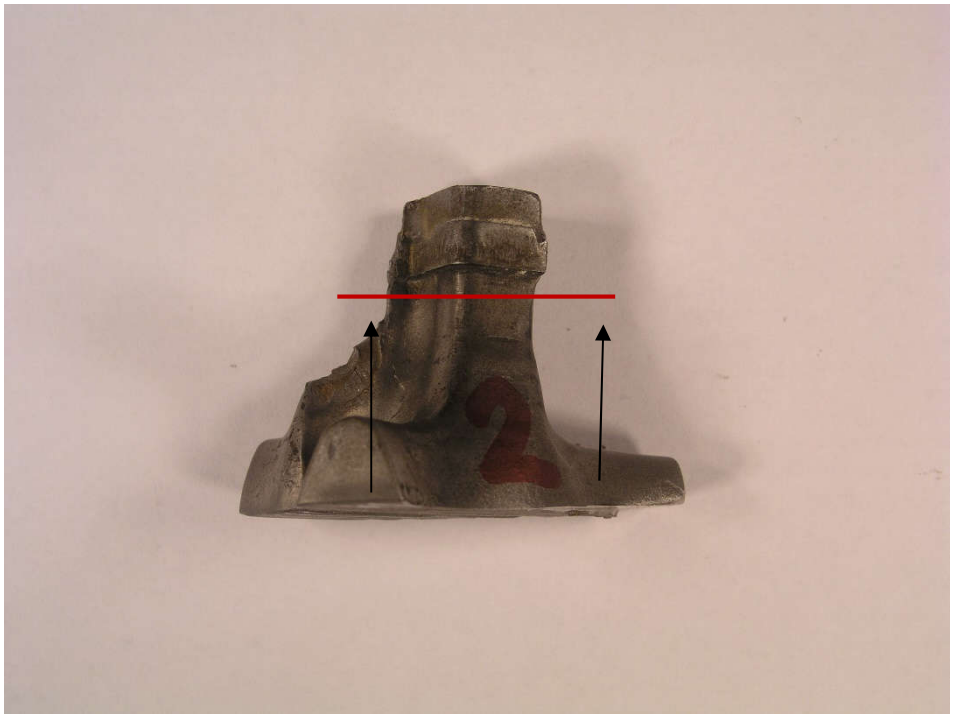
Slika 19. Mjesta izrezivanja uzoraka

Na slici 20 prikazan je uzorak 1 izrezan iz vrha 1 nakon izrezivanja. Crvena linija označava liniju gdje je uzorak prerezan, dok strelice označavaju smjer analize uzorka.

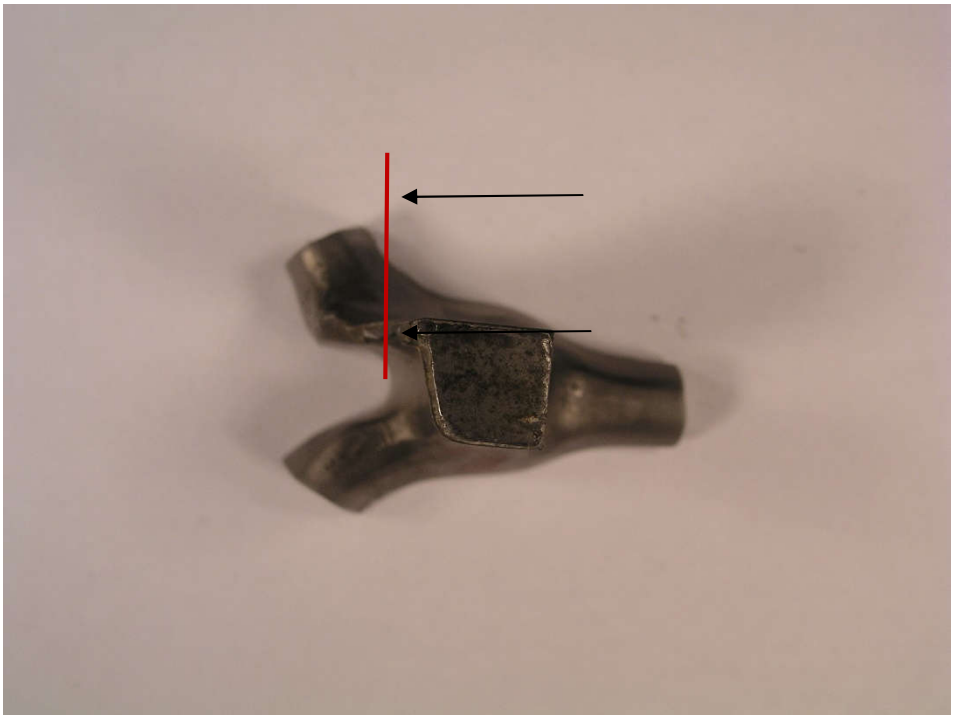


Slika 20. Uzorak 1

Na slikama 21 i 22 prikazan je vrh 2 iz kojega su izrezani uzorci 2 i 3. Kao i u prethodnom primjeru crvena linija označava liniju gdje je uzorak prerezan, dok strelice označavaju smjer analize.



Slika 21. Uzorak 2



Slika 22. Uzorak 2

Nakon izrezivanja uzoraka bilo je potrebno uliti uzorke u polimernu masu. Razlog ulijevanja u polimernu masu je zaštita uzorka od vanjskih oštećenja, uniformirati oblik radi automatske obrade na strojevima(brušenja i poliranja) te mogućnosti bolje analize rubova na kojima bi greške inače mogle promaknuti. U ovome slučaju u polimernu masu te na daljnju analizu ulivena su 3 uzorka, jedan je od uzorka 1, u potpunosti prelomljenog vrha, gdje je za daljnju analizu pripremljen poprečni presjek prijelomne površine, i 2 uzorka iz uzorka 2, djelomičnih oštećenja vrha. Uliveni uzorci prikazani su na slici 23.

Slika 23. Uzorci uliveni u polimernu masu

Sljedeći korak u pripremi je brušenje uzoraka. Brušenjem se nastoji skinuti sloj prljavštine, apsorbiranih plinova, oksida i plastično deformiranog sloja na uzorku, kako bi materijal koji je ostao bio referentan materijalu koji se ispituje. Parametri brušenja su vrsta brusnog papira, kemijski sastav abraziva, zrnatost i oblik abraziva, sredstvo za podmazivanje, sila brušenja, vrijeme brušenja i brzina okretanja brusnog diska.

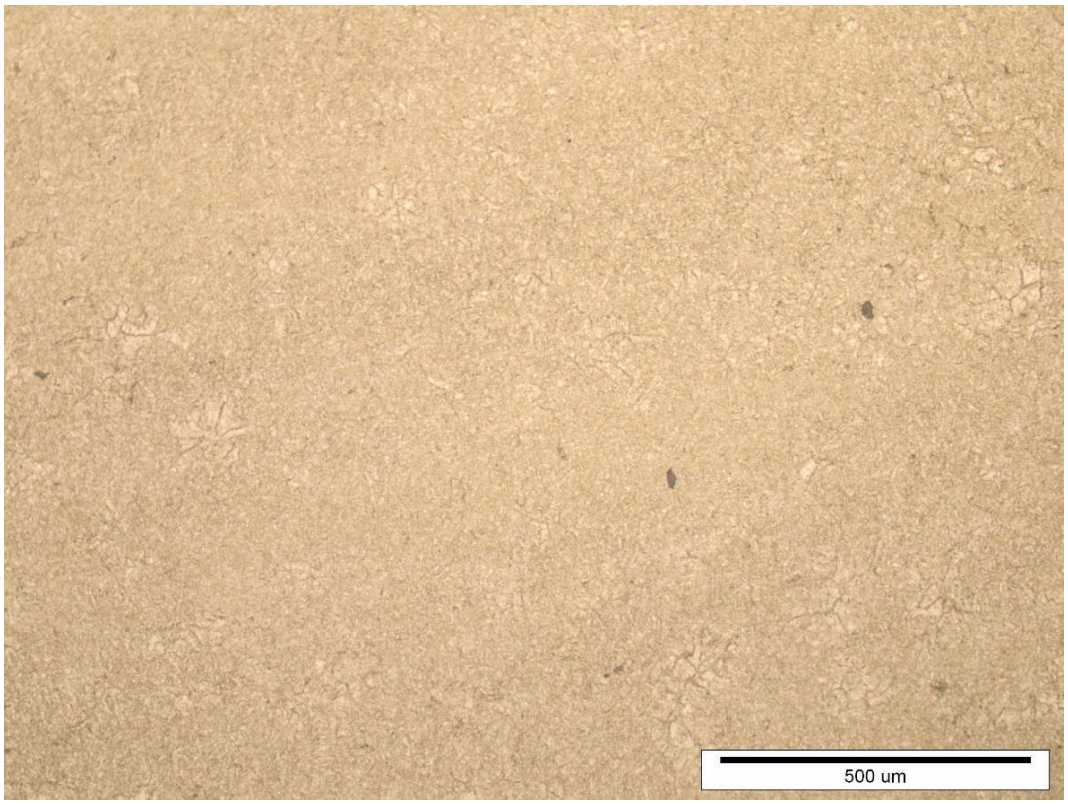
Nakon brušenja potrebno je ispolirati uzorak. Poliranjem se uzorak dovodi do zrcalnog sjaja. Radi se na istom principu kao i kod brušenja, ali s manjim dimenzijama abrazivnih čestica koje daju sjajnu, glatku površinu. U poliranom stanju analiziraju se porozitet, nemetalne uključine i pukotine.

Nagrizanje uzoraka je završni korak pripreme. To je postupak selektivnog korodiranja površine s namjerom da se istakne mikrostruktura uzorka. Na ovaj način može se vidjeti kristalna zrna i ostale karakteristike materijala nevidljive u nenagriženom stanju. Parametri nagrizanja su sredstvo, vrijeme, temperatura ili jakost električne struje. Tipovi nagrizanja su kemijsko, pogodno za čelike, lake i obojene metale, elektrolitičko, pogodno za nehrđajuće čelike i obojeno, svako zrno se oboji u drugu boju, pogodno za analizu granica zrna, ali otežava analizu mikrostrukture. Uzorak za analizu nagrižen je kemijski a sredstvo za nagrizanje je nital (3%HNO_3 + alkohol).

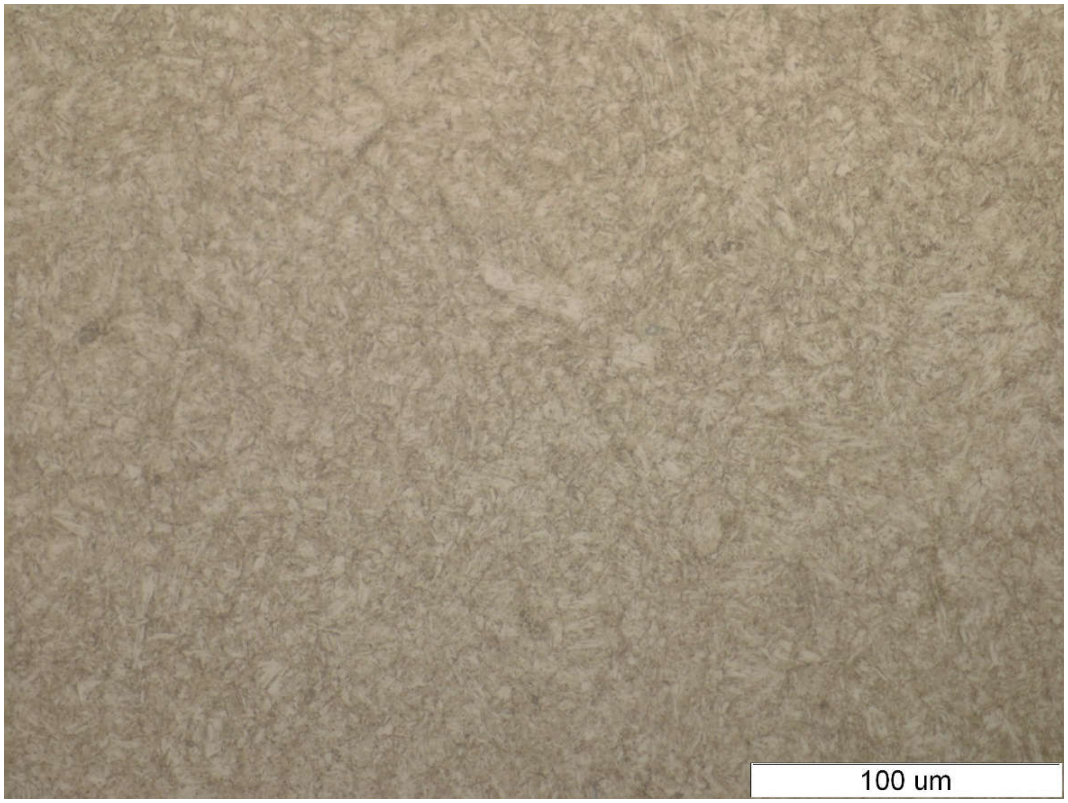
4.3. ANALIZA MIKROSTRUKTURE UZORAKA

Nakon što makroskopskom analizom nije ustanovljen uzrok loma kao ni mehanizam trošenja pristupilo se mikroskopskoj analizi uzoraka. Prva faza je analiza na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51F-5. Na mikroskopu su ispitana sva 3 uzorka da bi se utvrdio mehanizam i uzrok nastanka oštećenja.

Prvi uzorak je potpuno slomljeni vrh, vrh 1. Vizualnim pregledom nisu uočeni nikakvi karakteristični tragovi koji bi upućivali na uzrok loma. Prvi korak je bila analiza središta uzorka koji je zapravo poprečni presjek prijelomne površine da bi se eventualno pronašao uzrok loma. Na slikama 24 i 25 prikazana je jezgra uzorka 1.

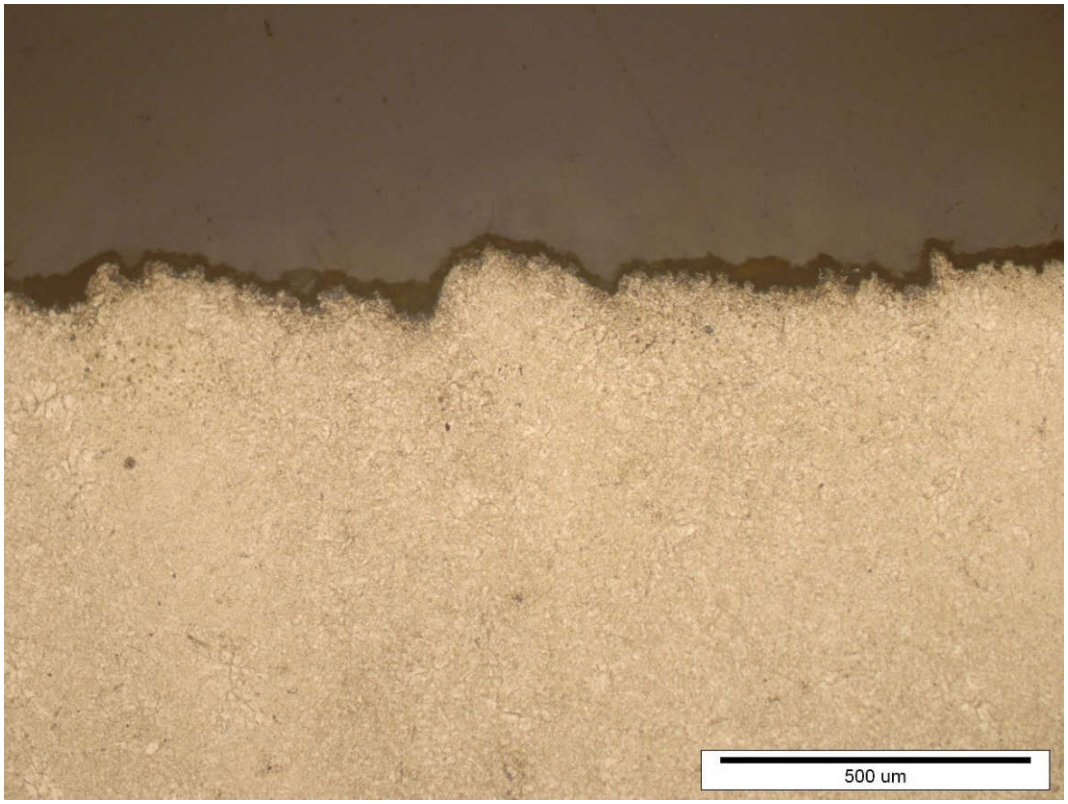


Slika 24. Uzorak 1-jezgra

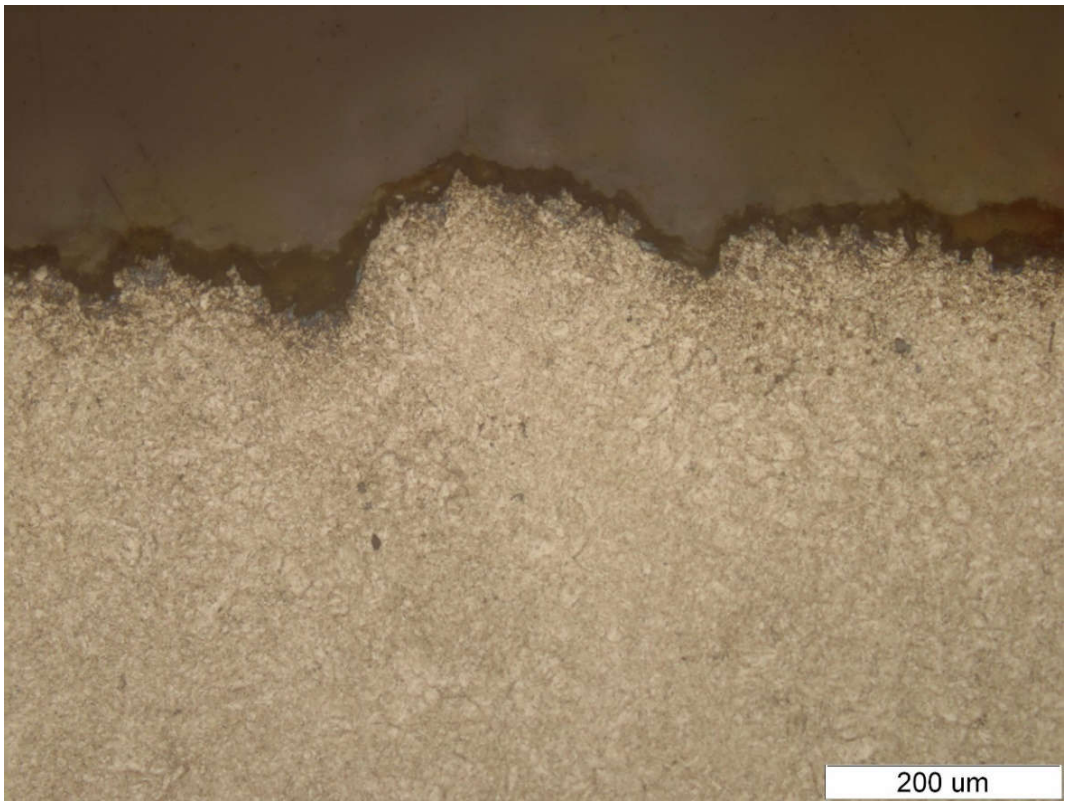


Slika 25. Uzorak 1-jezgra

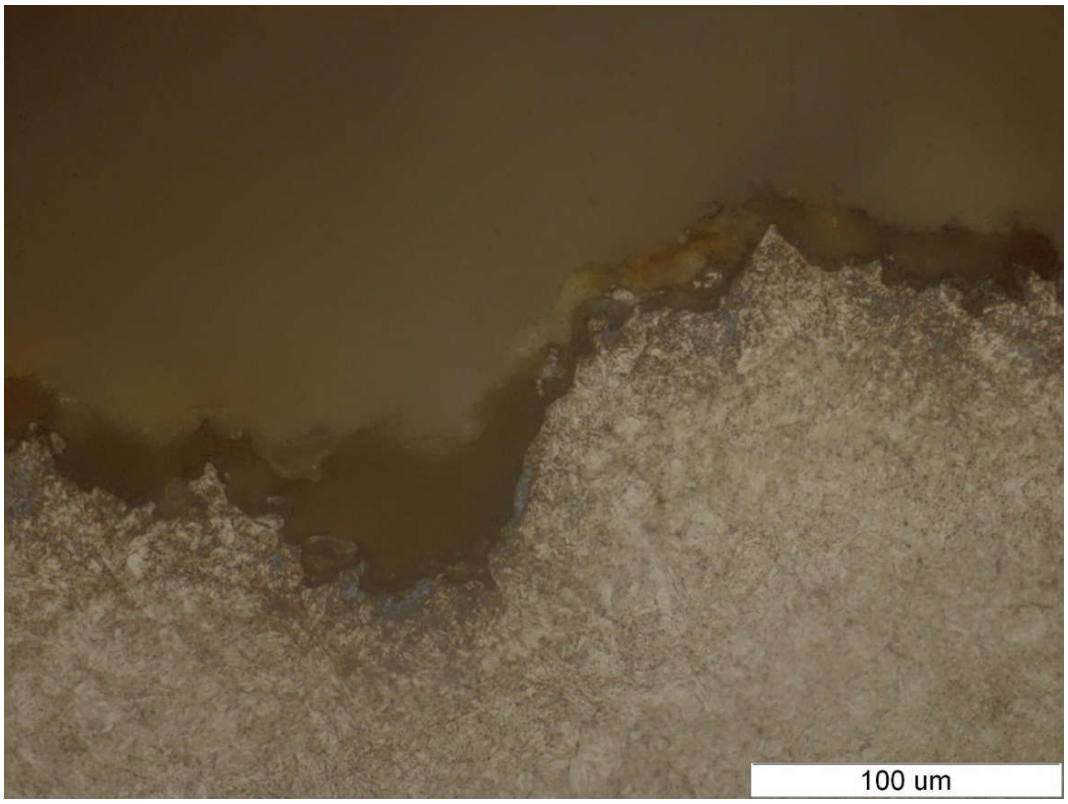
Analizom jezgre uzorka nisu uočene nikakve greške unutar jezgre koje bi mogle uzrokovati lom. Mikrostruktura jezgre sastoji se od popuštenog martenzita s karbidima. Nadalje je potrebno analizirati prijelomnu površinu kao i rub alata koji nije zahvaćen prijelomom, odnosno predstavlja rub cijelog alata. Na slikama 26, 27 i 28 prikazan je prijelomna površina vrha 1.



Slika 26. Uzorak 1-prijelomna površina

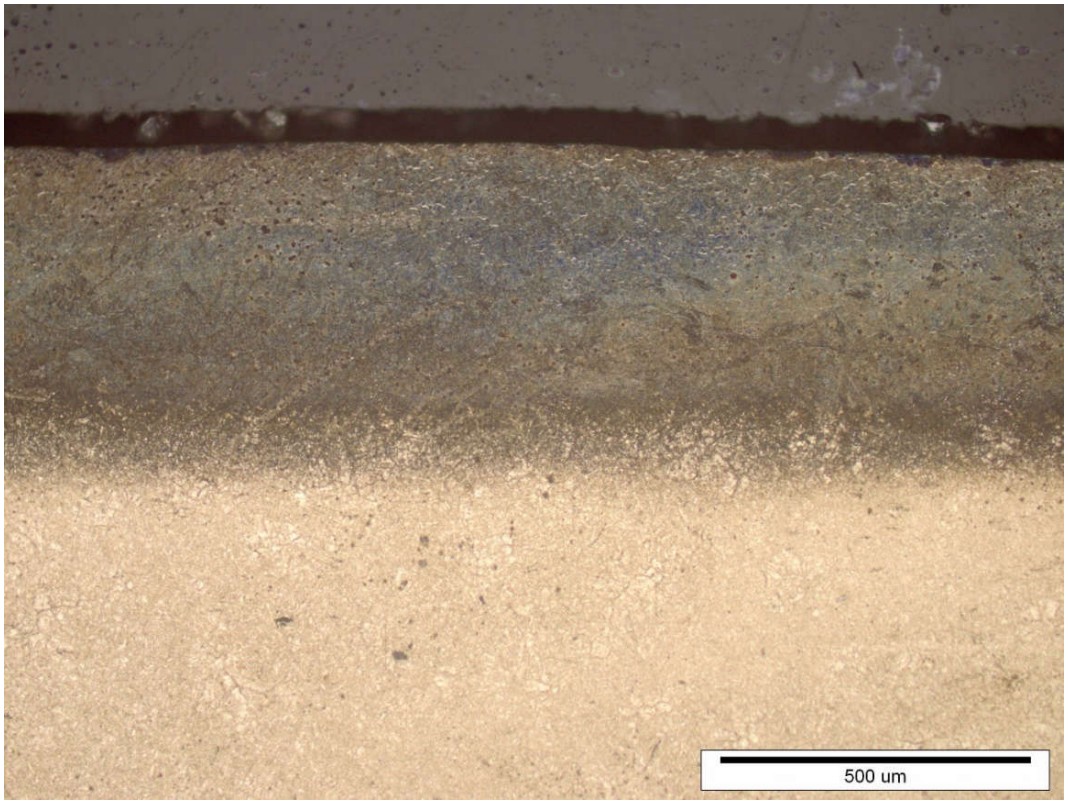


Slika 27. Uzorak 1-prijelomna površina

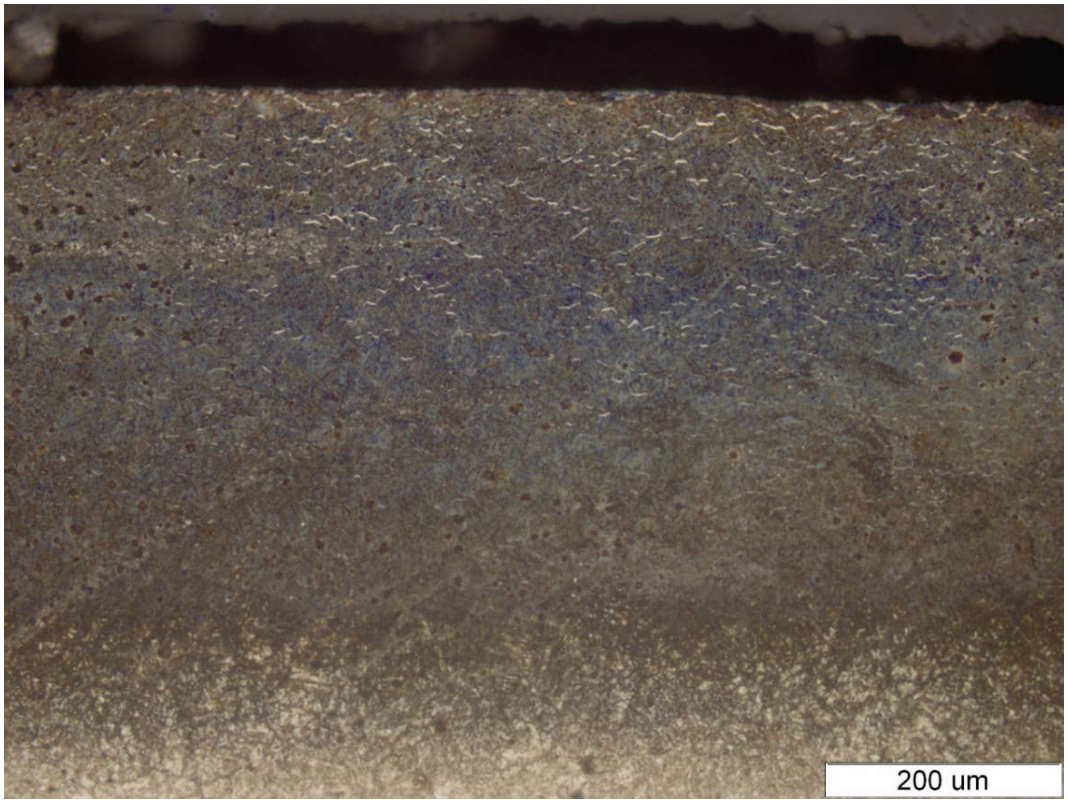


Slika 28. Uzorak 1-prijelomna površina

Na slikama je vidljiva prijelomna površina karakterističnog izgleda za trenutni lom. Zbog karakterističnog izgleda površine, kao i svojstava materijala može se zaključiti da je mehanizam loma krhki lom. Mogući razlozi prekoračenja naprezanja u ovom slučaju su niska temperatura trupca, prevelik tlak provlačenja ili prevelika brzina kretanja klipa. Na slikama 29 i 30 prikazan je neoštećeni rub vrha 1.



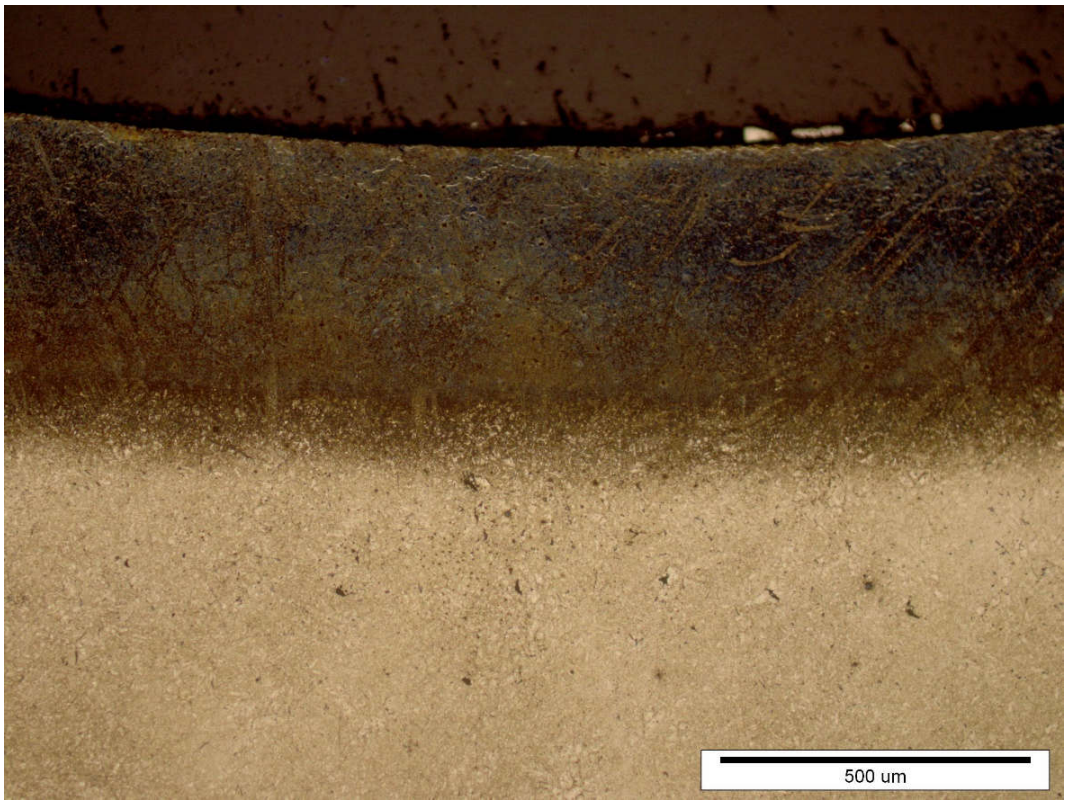
Slika 29. Uzorak 1-nitrirana površina



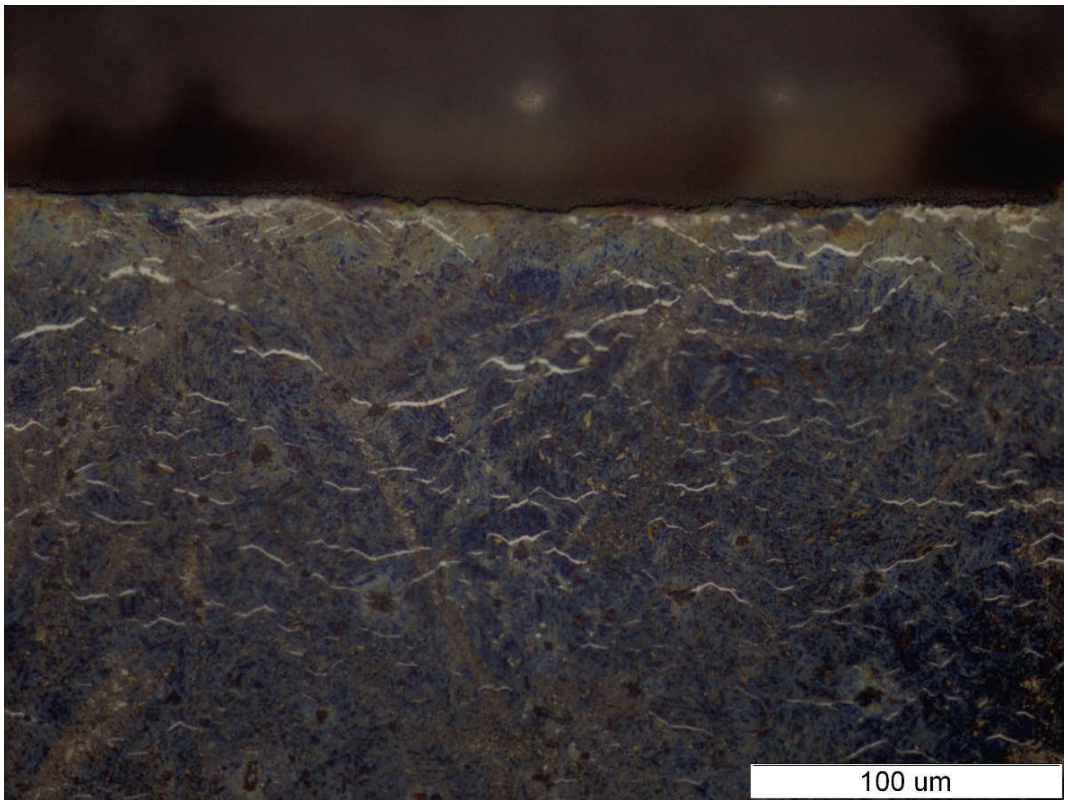
Slika 30. Uzorak 1- nitrirana površina

Na slikama se primjećuje da je površina uzorka nitrirana, bez oštećenja na prijelomnoj površini i bez pukotine koje se protežu u dubinu materijala.

Sljedeći korak je analiza drugog oštećenog vrha, vrha 2 iz kojega su izrezana 2 uzorka. Na slikama 31 i 32 prikazan je rub oštećenog vrha.

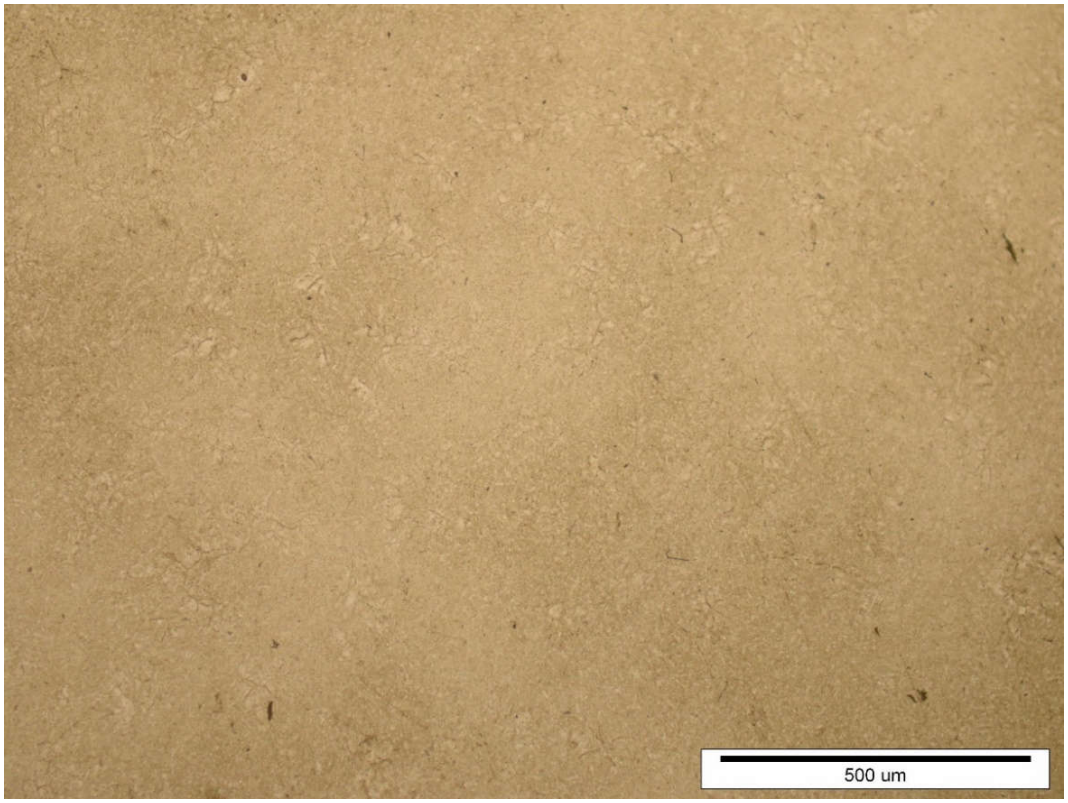


Slika 31. Uzorak 2- nitrirana površina

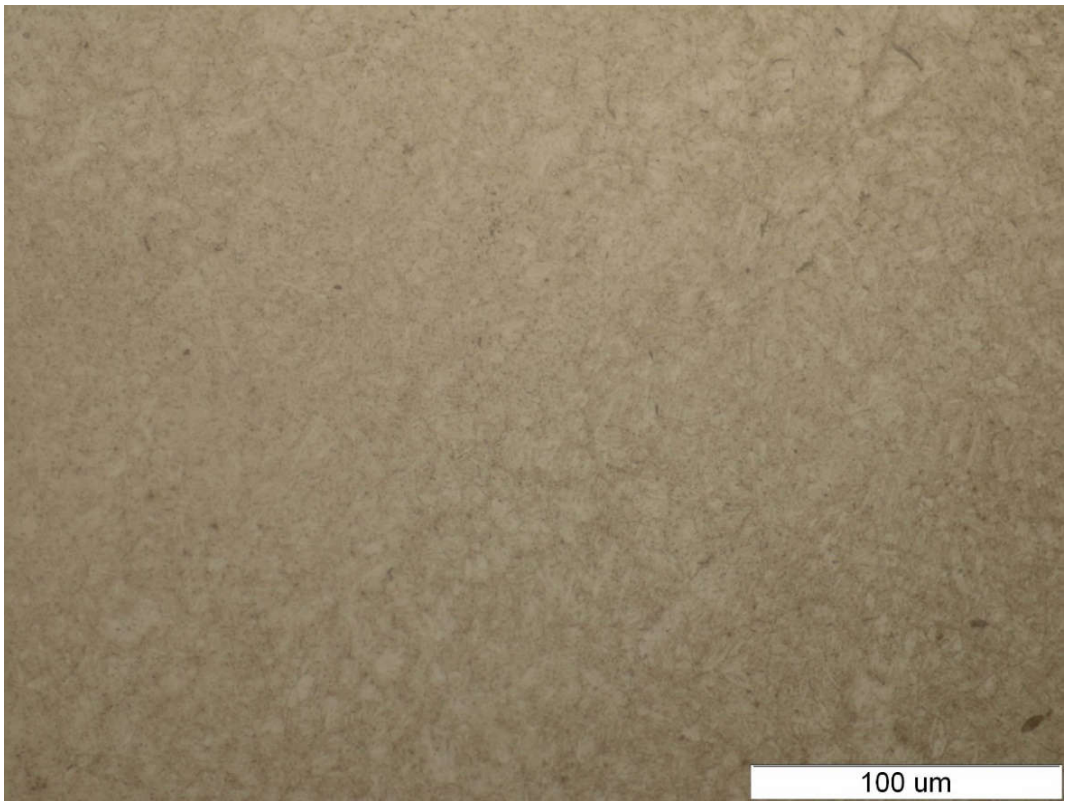


Slika 32. Uzorak 2- nitrirana površina

Kao i kod uzorka 1 na rubu nisu uočena nikakve greške u strukturi materijala koje bi mogle objasniti lom. Također je jasno vidljiv nitrirana površina bez oštećenja. Nadalje je potrebno provjeriti ima li u jezgri drugog oštećenog vrha ikakvih oštećenja ili grešaka koje mogu objasniti lom. Na slikama 33 i 34 prikazana je jezgra drugog oštećenog vrha.

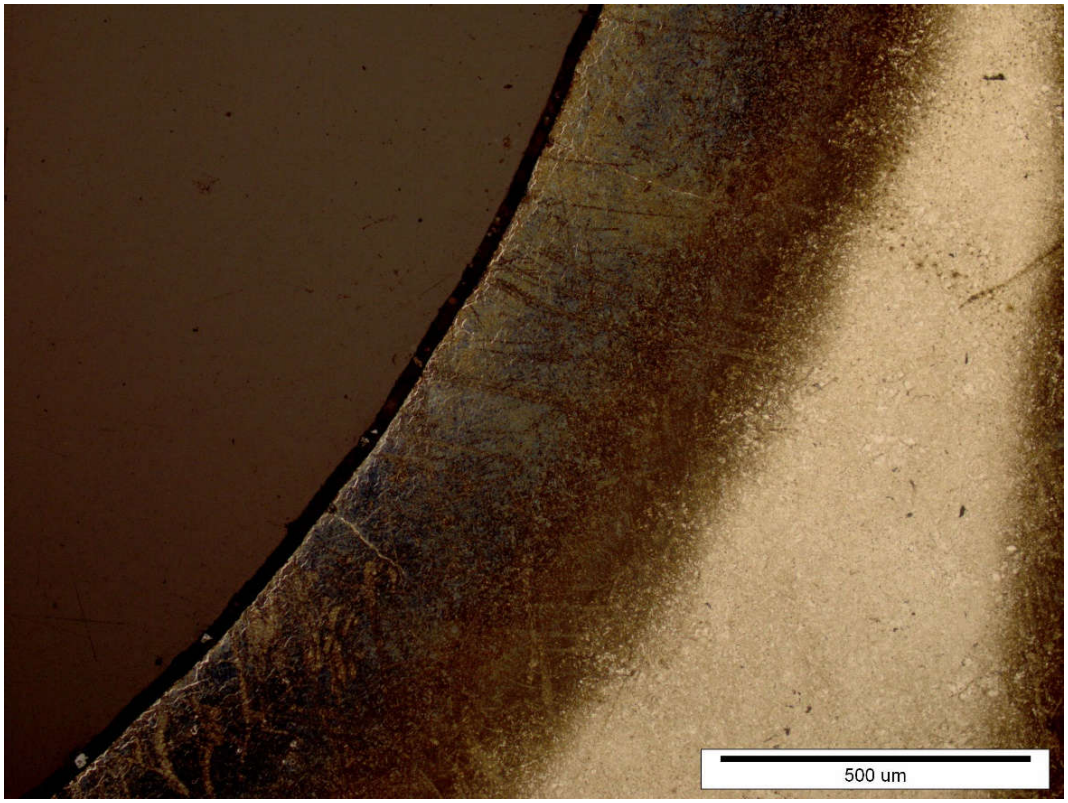


Slika 33. Uzorak 2-jezgra



Slika 34. Uzorak 2-jezgra

Kao i na uzorku 1 nisu uočena nikakva oštećenja u jezgri uzorka kao ni greške koje bi dovele do mogućeg uzroka loma. Mikrostruktura materijala je popušteni martenzit s karbidima. Nadalje potrebno je analizirati rub uz samo oštećenje drugoga vrha da bi se dobio uvid u eventualni uzrok loma. Na slici 35 prikazan je vrh neposredno ispod prijelomne površine drugog vrha.

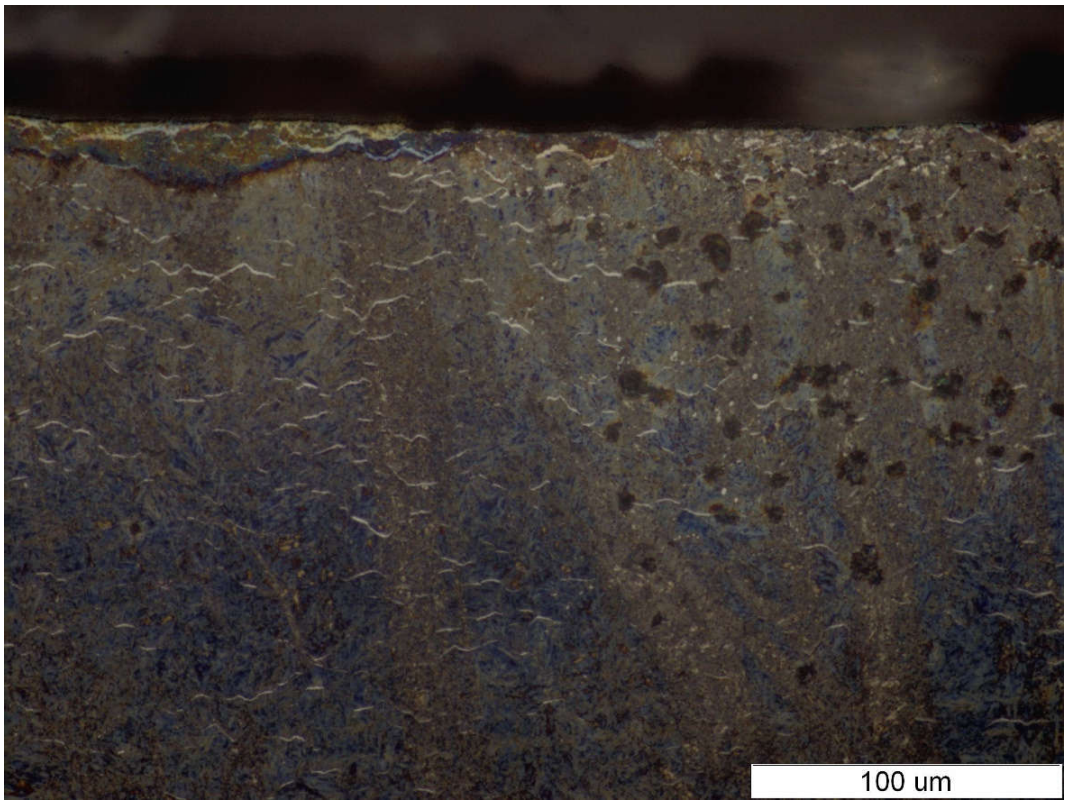


Slika 35. Uzorak 2- nitrirana površina

Kao i prilikom analize ostalih uzoraka nije uočene greške u strukturi materijala koje bi ukazivale na uzrok loma.

Ista analiza kao i u prethodna 2 uzorka provedena je s trećim uzorkom koji je izrezan iz drugog, manje oštećenog vrha. Na slikama 36 i 37 prikazana je nitrirana površina uzorka 3.

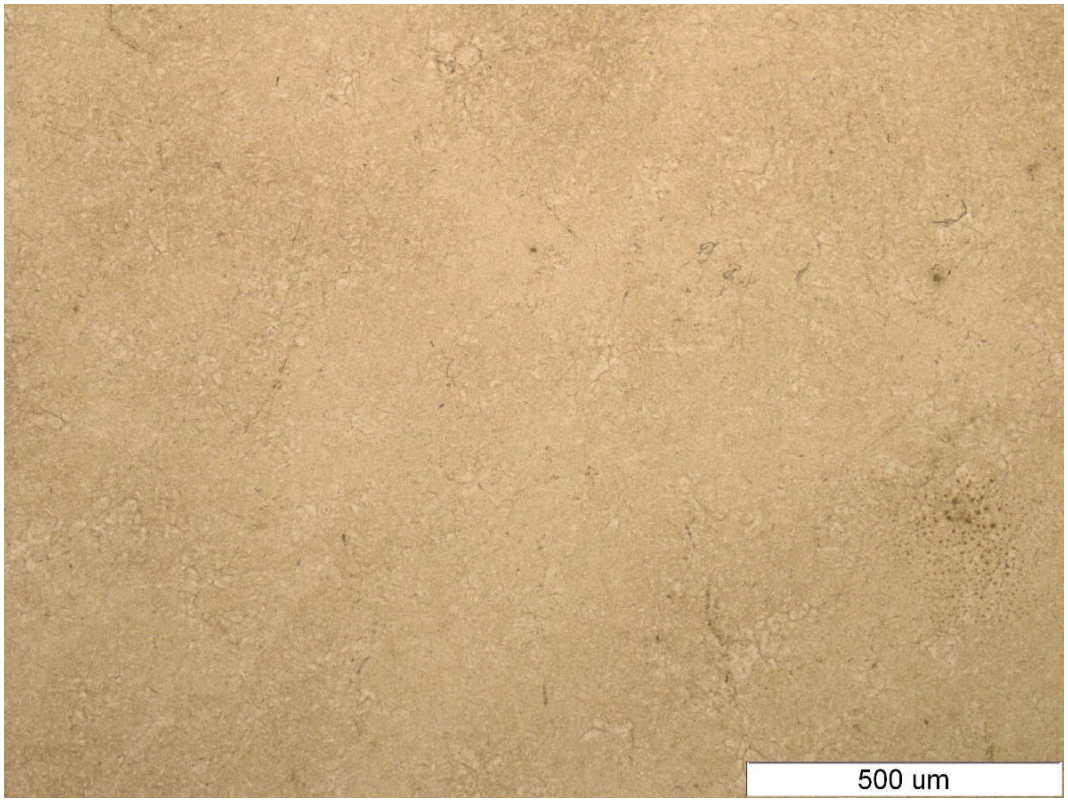
Slika 36. Uzorak 3- nitrirana površina



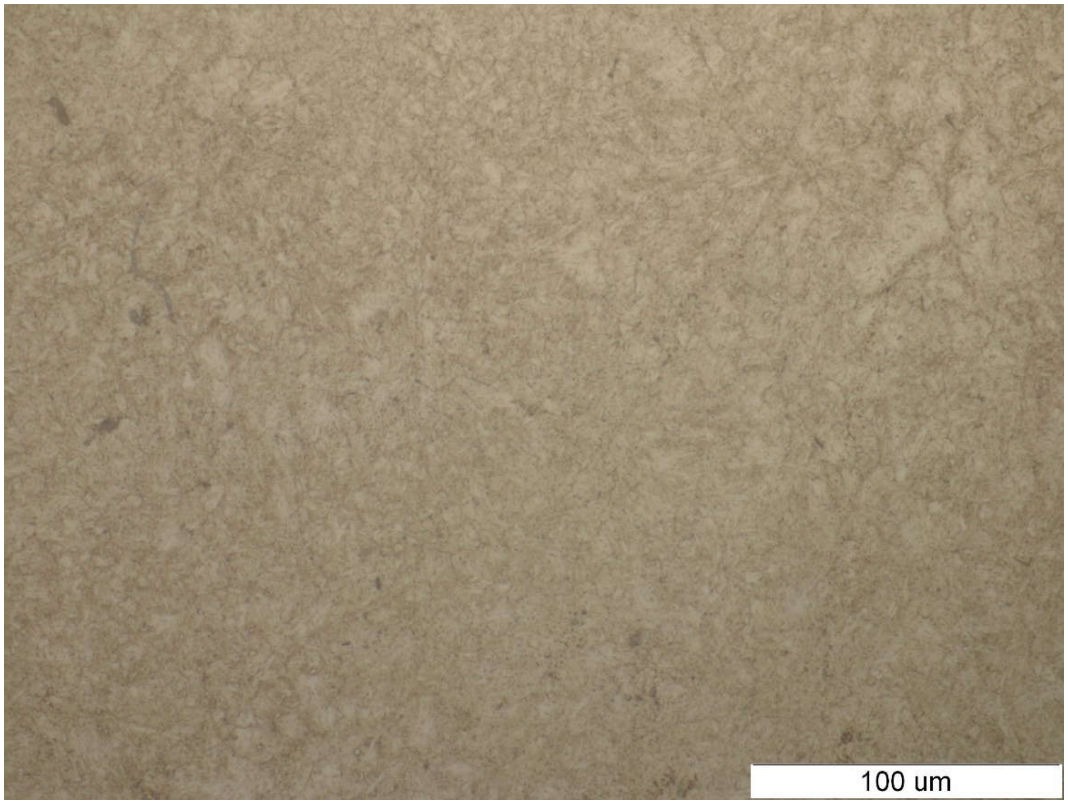
Slika 37. Uzorak 3- nitrirana površina

Na rubu nisu uočena nikakva oštećenja koja bi mogla uzrokovati lom, a vidljiv je i nitrirani sloj.

Na slikama 38 i 39 prikazana je jezgra uzorka 3.



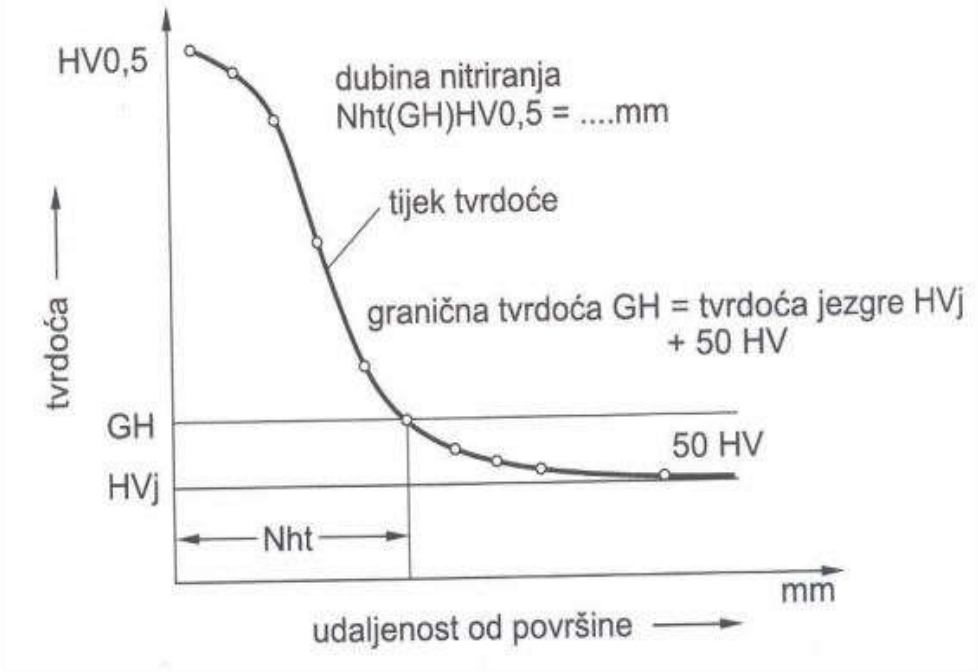
Slika 38. Uzorak 3-jezgra



Slika 39. Uzorak 3-jezgra

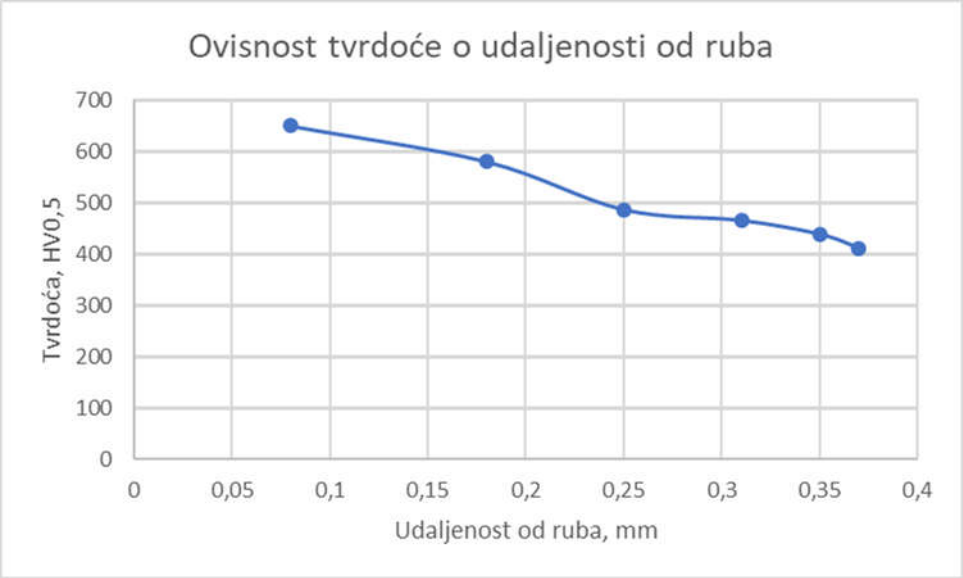
Kao i u prethodnim uzorcima u jezgri nisu uočena nikakva oštećenja, kao niti greške koje bi mogle ukazivati na uzrok loma.

S obzirom na to da su rubovi alata nitrirani, po podatcima dobivenima od tvrtke u kojoj je alat bio korišten alat je nitriran u plinskoj atmosferi, potrebno je izmjeriti dubinu nitriranog sloja. Ukupna dubina nitriranja je dubina do koje je dušik difunirao u čelik. Tvrdoća se mjeri po Vickers-ovoj ili Knoop-ovoj metodi uz vrlo mala opterećenja. Efektivna dubina nitriranog sloja (Nht) je okomita udaljenost od mjesta gdje je granična tvrdoća za 50HV veća od tvrdoće jezgre [9]. Na slici 40 prikazan je princip određivanja dubine nitriranog sloja.



Slika 40. Princip određivanja dubine nitriranog sloja [9]

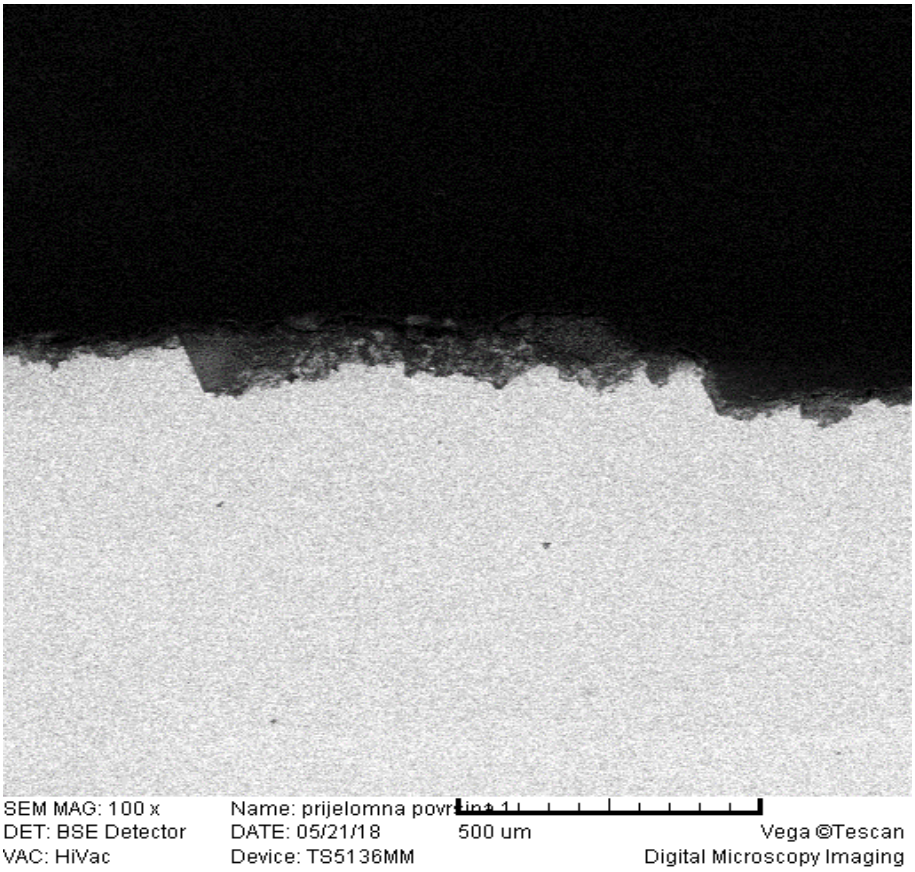
Mjerenje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje na tvrdomjeru Zwick inventarnog broja 301/HV. Prosječna tvrdoća jezgre ispitanog uzorka iznosi 388HV0,5.



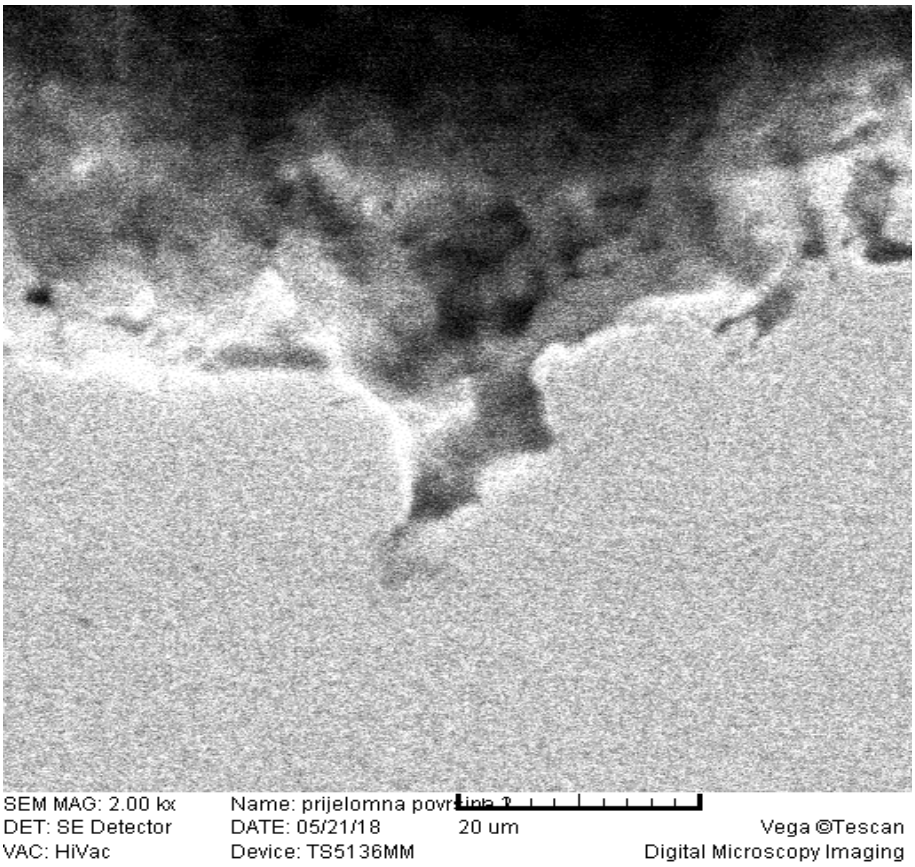
Slika 41. Ovisnost tvrdoće o udaljenosti od ruba

Izmjerena debljina nitriranog sloja iznosi 0,35mm.

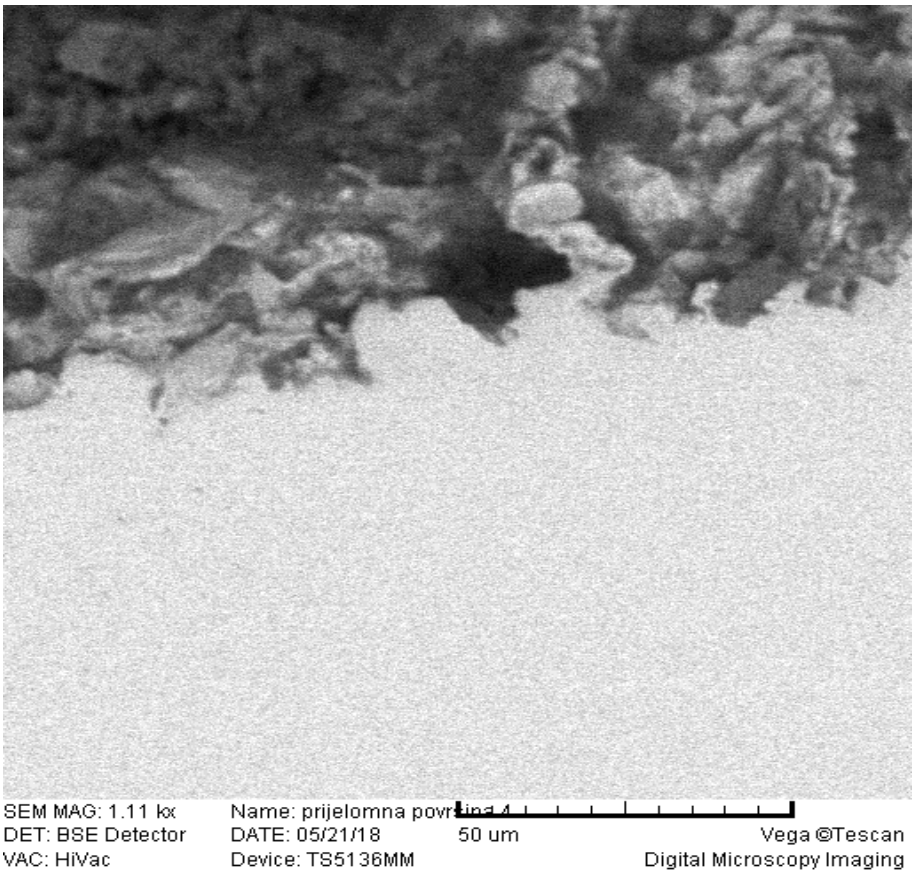
Nakon analize na svjetlosnom mikroskopu uslijedila je analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu(SEM). Razlog te analize je što elektronski mikroskop ima mogućnost većih povećanja, bolje rezolucije i dubinske oštrine nego svjetlosni i samim time moguće je uočiti greške manjih dimenzija u materijalu. Analiza je obavljena na mikroskopu Vega Tescan TS5136MM. Na slikama 42, 43, 44 i 45 prikazan je prijelomna površina.



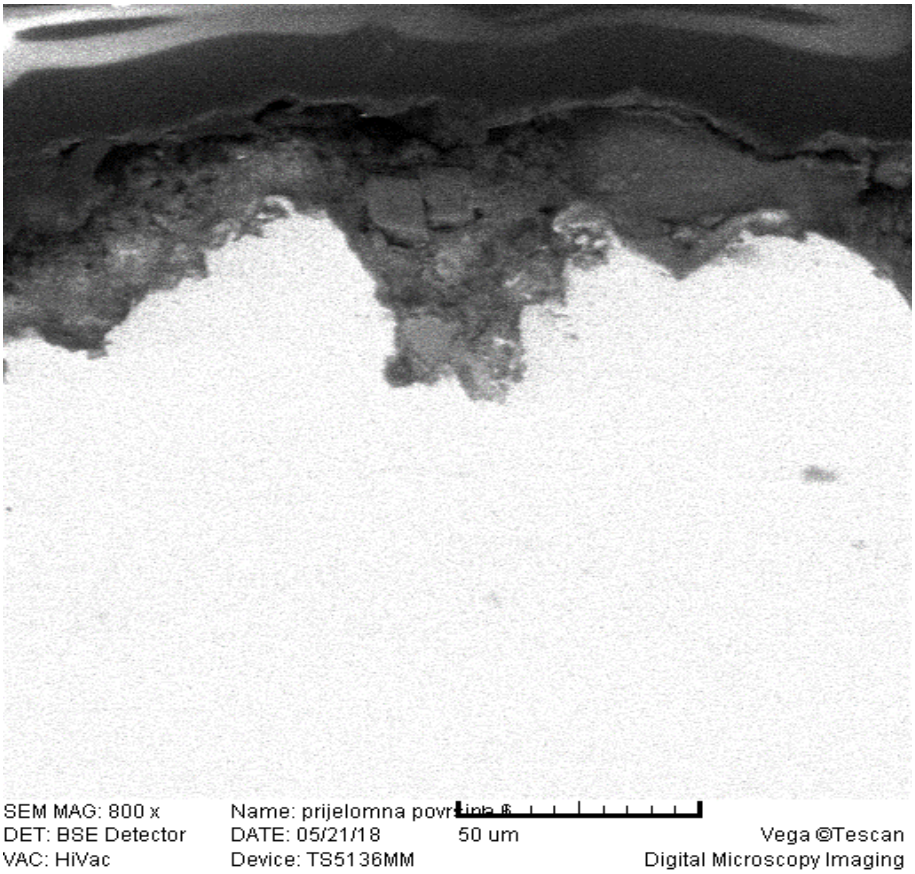
Slika 42. Prijelomna površina 1, SEM



Slika 43. Prijelomna površina 2, SEM

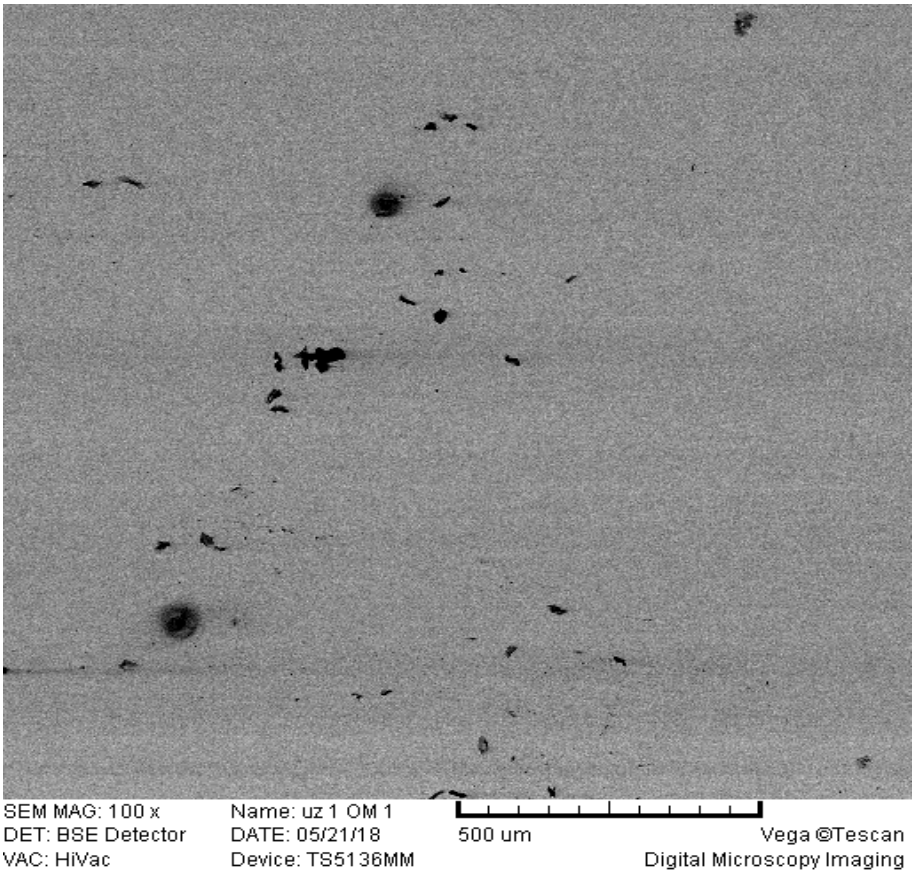


Slika 44. Prijelomna površina 3, SEM



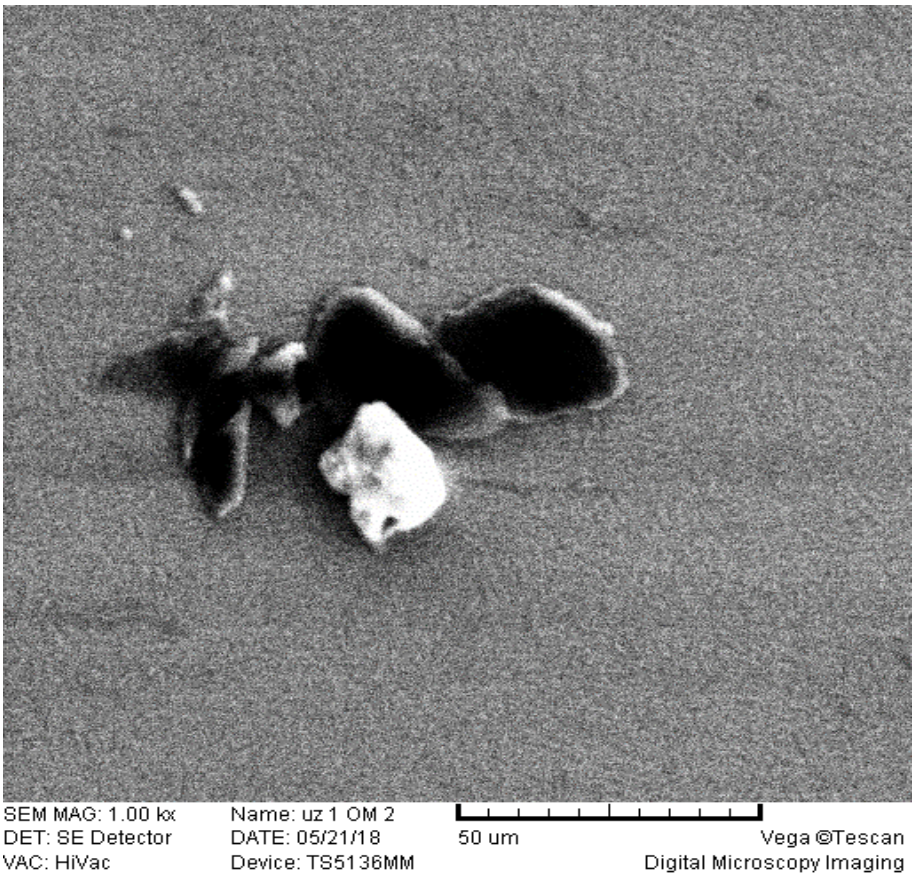
Slika 45. Prijelomna površina 4, SEM

Pregled prijelomne površine uzorka na skenirajućem elektronskom mikroskopu potvrđuje da je mehanizam loma krhki lom. Karakteristični izgled prijelomne površine vidljiv je i pri analizi pomoću elektronskog mikroskopa. Sljedeći korak je promatranje osnovnog materijala uzorka u cilju pronalaska mogućeg uzroka loma. Na slici 46 prikazan je osnovni materijal.



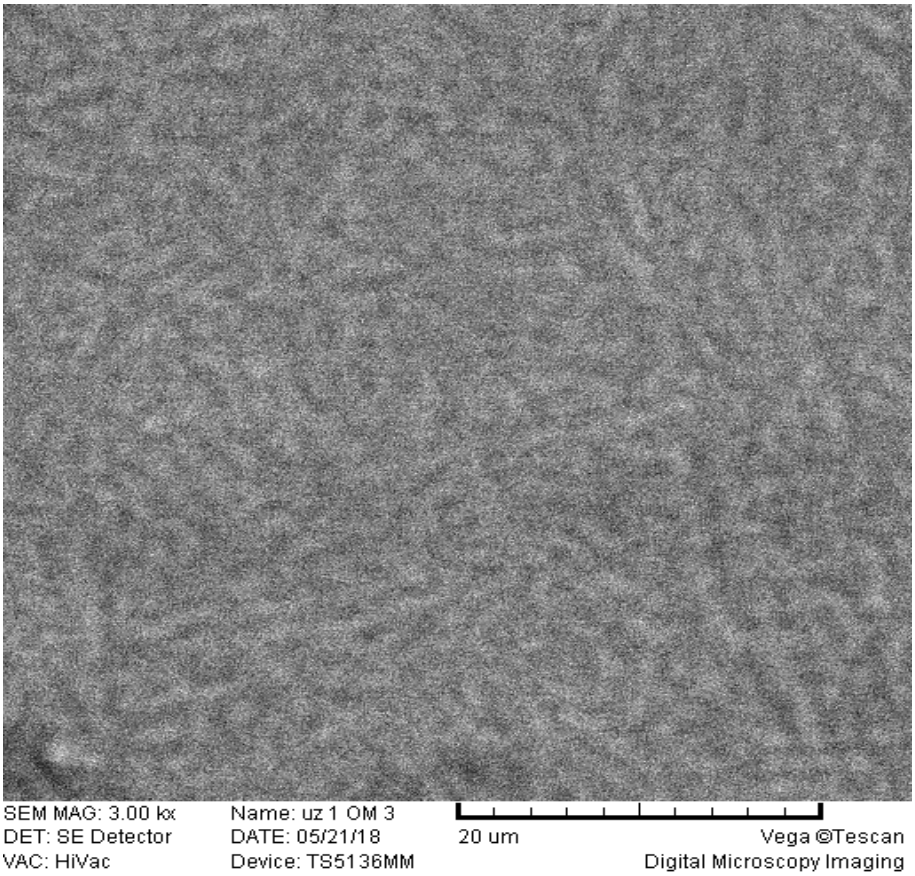
Slika 46. Jezgra uzorka 1, SEM

Korištenjem BSE detektora vidljive crne mrlje koje mogu ukazivati na prisutnost pogrešaka u osnovnom materijalu koje bi mogle dovesti do loma alata. BSE detektor (backscatterd electrons) prikazuje razlike u kemijskom sastavu promatranog uzorka. Da bi se utvrdilo je li riječ o takvim greškama potrebno je promotriti taj dio pri drugom povećanju kao i promijeniti detektor koji proizvodi sliku. Na slici 47 prikazan je isti uzorak pri promjeni povećanja i detektora na SE detektor.



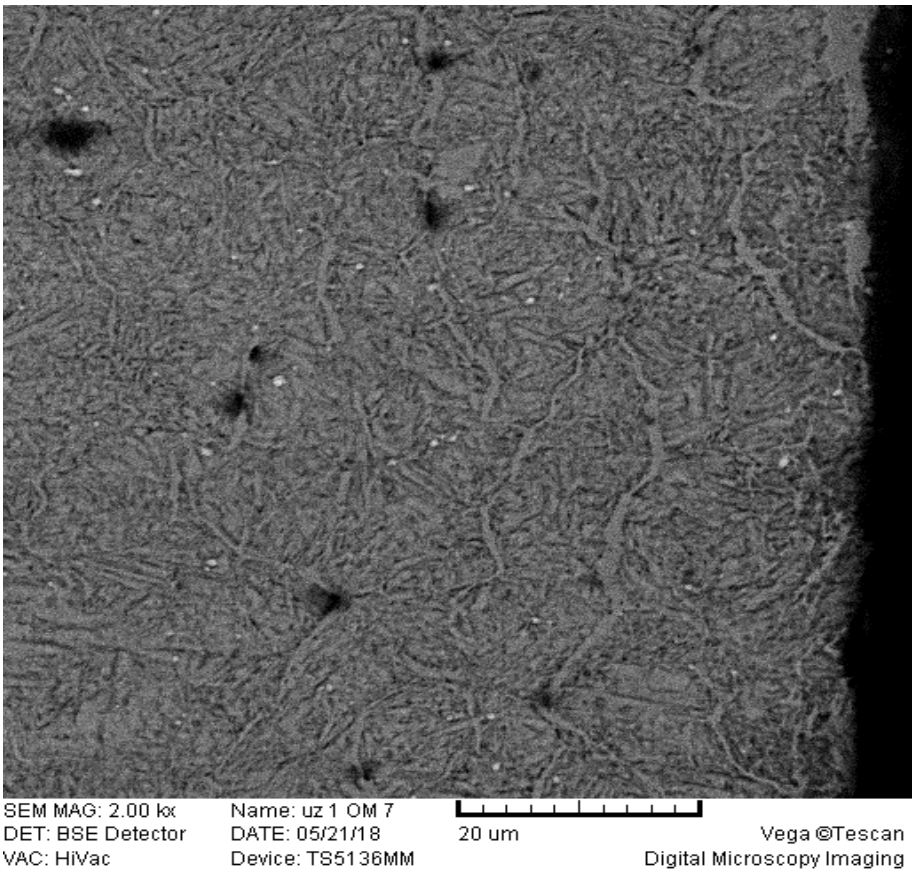
Slika 47. Moguća greška, SEM

Promjenom detektora na detektor sekundarnih elektrona, koji prikazuje topografiju površine uzorka, ustanovljeno je da sama greška nije u materijalu već je površina uzorka kontaminirana stranim česticama, a nisu uočene nikakve greške koje bi mogle dovesti do loma alata. Na slici 48 prikazan je površina osnovnog materijala na kojoj nisu vidljive nikakve greške.

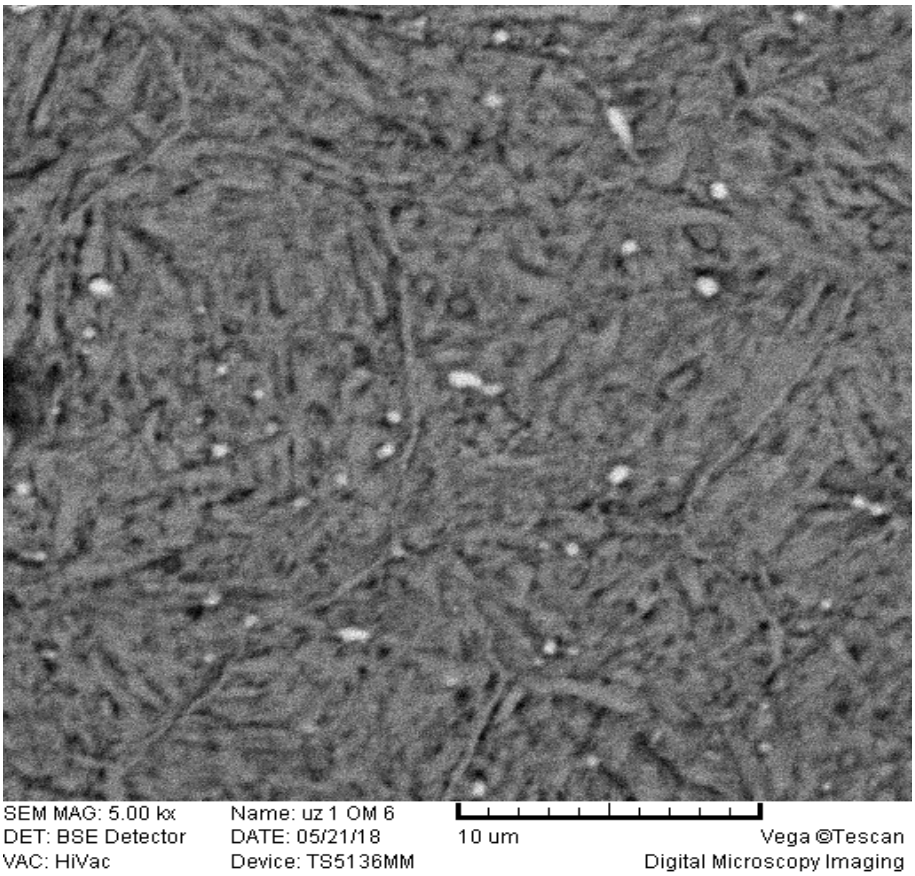


Slika 48. Jezgra uzorka 1 bez uočenih mogućih grešaka, SEM

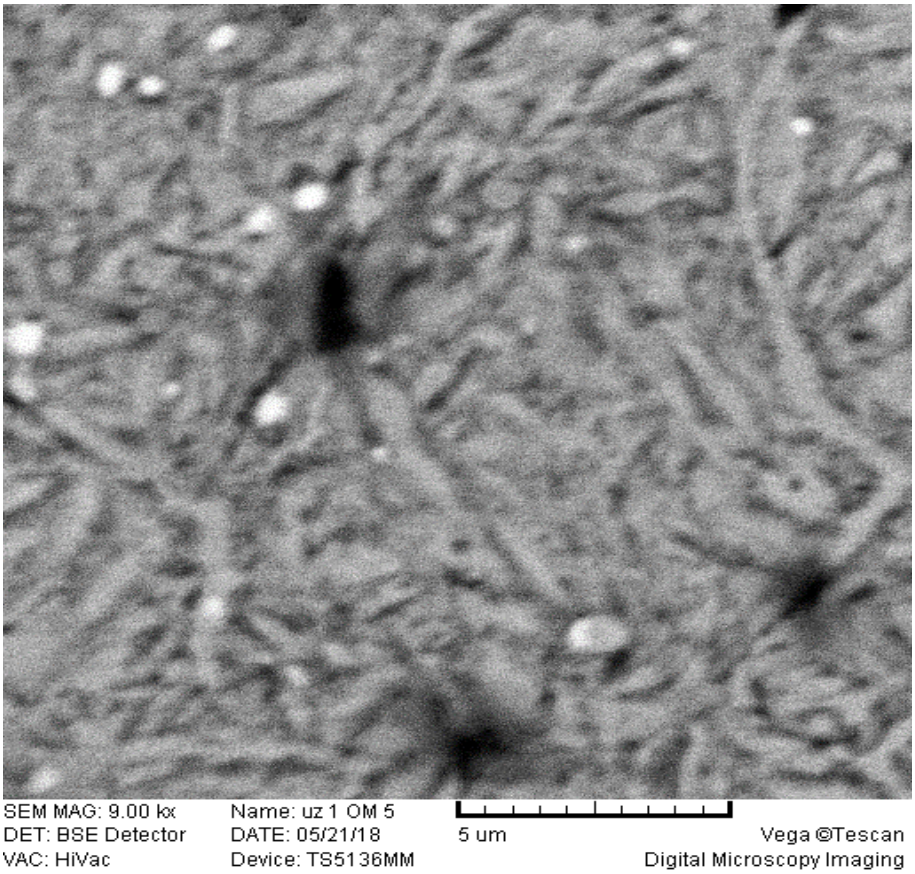
Nakon analize prijelomne površine i osnovnog materijala uzorka 1 potrebno je proučiti i neoštećenu površinu ruba kako bi se uočile eventualne greške na površini alata koje su mogle dovesti do loma. Na slikama 49, 50, 51 i 52 prikazana je neoštećena površina uzorka 1.



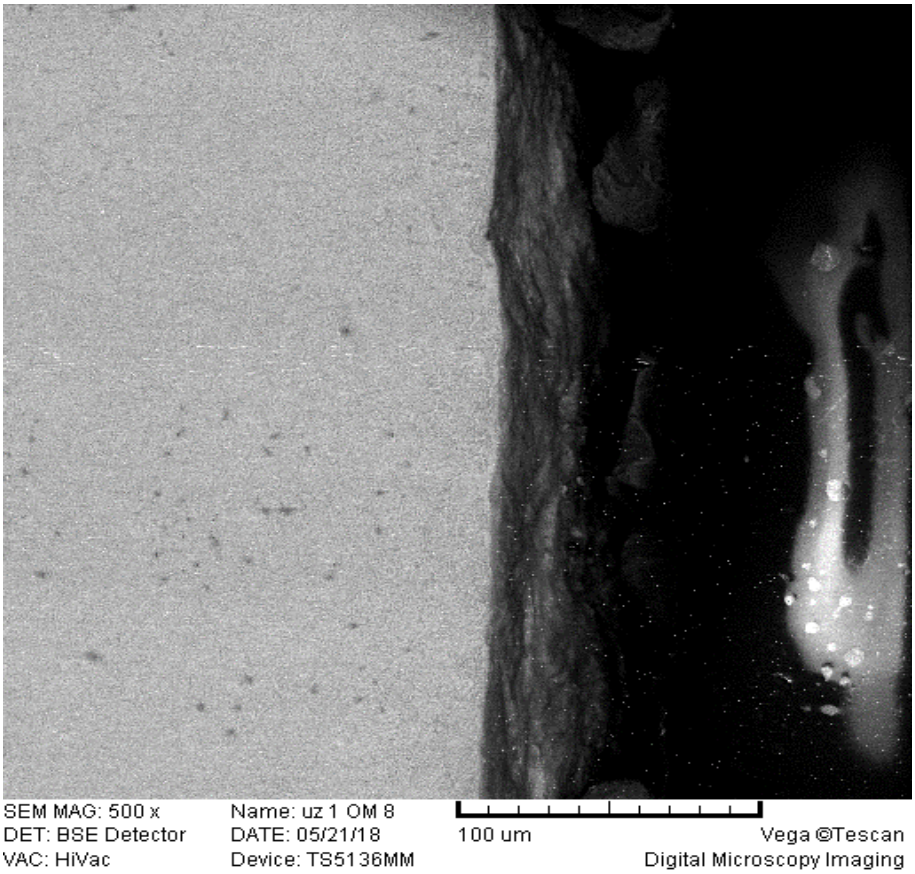
Slika 49. Površina uzorka 1, SEM



Slika 50. Površina uzorka 1, SEM



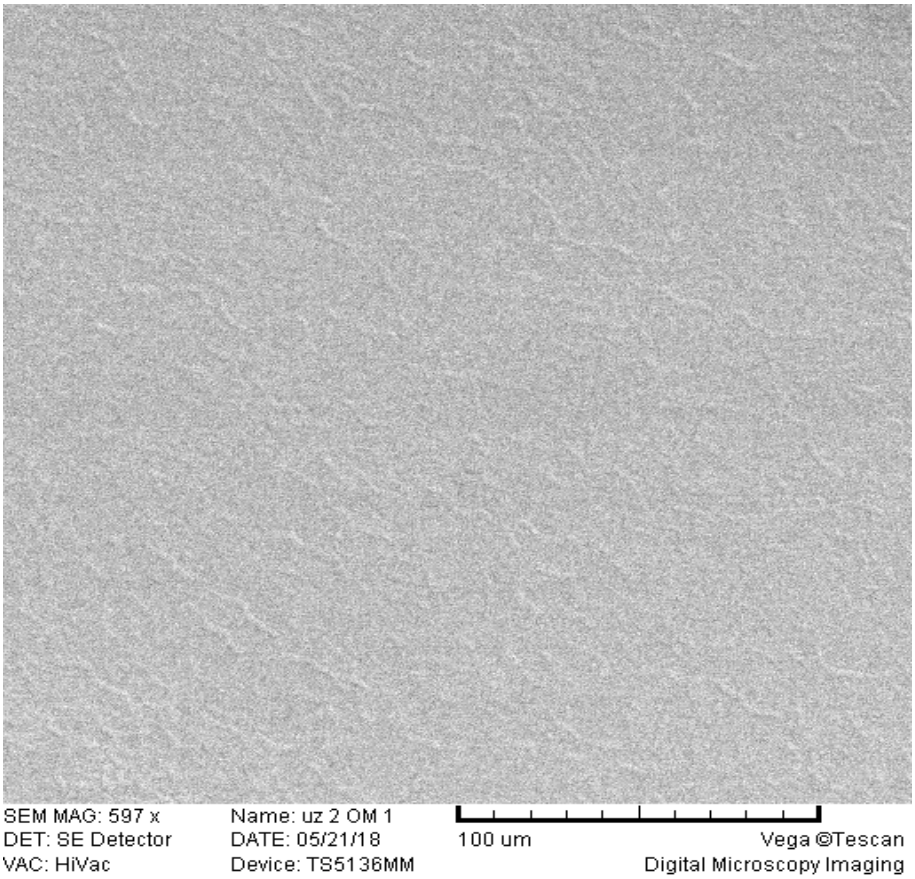
Slika 51. Površina uzorka 1, SEM



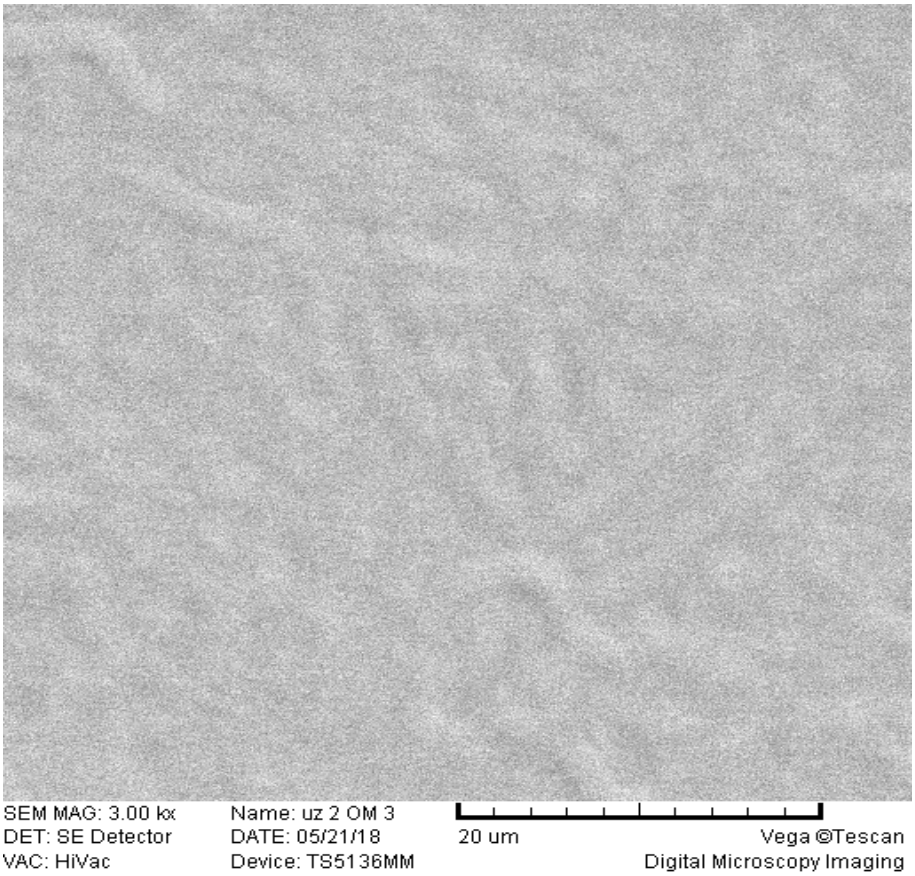
Slika 52. Površina uzorka 1, SEM

Na slikama nisu uočena nikakva oštećenja koja bi ukazala na uzrok loma alata unutar materijala.

Također je analiziran i uzorak 2 s istom namjerom pronalaska mogućeg uzroka loma unutar materijala. Na slikama 53 i 54 prikazan je uzorak 2 snimljen na elektronskom mikroskopu.



Slika 53. Jezgra uzorka 2, SEM



Slika 54. Jezgra uzorka 2, SEM

Kao i kod uzorka 1 nisu uočena nikakva oštećenja kao niti pogreške u materijalu koje bi mogle objasniti lom alata.

Mikroskopskom analizom uzoraka ustanovljeno je da je mehanizam loma alata krhki lom, a mogući uzrok loma nije uočen u strukturi materijala, te je potrebno uzrok loma potražiti u vanjskim utjecajima koji su djelovali na alat u uporabi, ponajviše na silu kojom klip djeluje na trupac prilikom provlačenja.

Da bi se u potpunosti utvrdilo je li uzrok loma u materijalu ili u vanjskim silama provedeno je mjerenje mikrotvrdoće kako bi se ustvrdilo je li došlo do popuštanja alata u toku primjene. Svrha ispitivanja tvrdoće mikro-utiskivanjem je precizno mjerenje promjena tvrdoće u ispitivanom materijalu. Ta tehnika ispitivanja poznata je pod nazivom ispitivanje mikrotvrdoće; iako je pojam neprikladan jer ostavlja dojam da se radi o vrlo malim vrijednostima izmjerene tvrdoće. Kod ispitivanja mikrotvrdoće sila opterećivanja ne prelazi 1,96 N. Koriste se Vickersova ili Knoopova metoda ispitivanja. Postupak je vrlo sličan standardnom Vickersovom ili Knoopovom postupku ispitivanju makrotvrdoće, samo što se radi na mikroskopskoj razini uz uređaje veće preciznosti i povećanja. Ispitivana površina zahtijeva kvalitetniju metalografsku pripremu. Za mjerenje veličine otisaka koriste se precizni mjerni mikroskopi, uobičajenog povećanja do nekoliko stotina puta. Mjerenje mikrotvrdoće zahtjeva veliko iskustvo i preciznost da bi se postigla zadovoljavajuća točnost mjerenja. Kod Vickersove metode uklonjeni su glavni nedostaci drugih metoda mjerenja tvrdoće. Dva osnovna nedostatka ostalih metoda su: ograničeno područje mjerenja, te ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja. Prvi nedostatak uklonjen je uporabom najtvrđeg materijala za indentor - dijamanta, a drugi oblikom indentora. To je kod Vickersove metode četverostrana piramida s vršnim kutom između nasuprotnih stranica od 136°. Piramida na ispitnom uzorku ostavlja otisak oblika šuplje piramide, čija je baza kvadrat sa dijagonalama d. Za izračun mikrotvrdoće potrebno je izračunati udaljenost između 2 dijagonale vrha otiska i zatim pomoću formule dolazimo do vrijednosti tvrdoće. Za statistički valjane rezultate za jedan rezultat mikrotvrdoće uzorak je potrebno minimalno 3 puta ispitati i izračunati prosjek rezultata [10]. U Tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja mikrotvrdoće.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

Uzorak i položaj	Tvrdoća, HV0,2
1-sredina	246
	391
	394
1-rub	447
	480
	420
2-vrh-sredina	379
	362
	409
2-rub-sredina	214
	217
	269

Prosječna mikrotvrdoćatvrdoća osnovnog materijala uzorka 1 iznosi 344HV0,2 a nitriranog ruba uzorka 1 449HV0,2. Prosječne vrijednosti tvrdoće uzorka 2, odnosno drugog vrha su 383HV0,2 i 233HV0,2. Mjerenje tvrdoće HV10 metodom dalo je rezultat tvrdoće jezgre materijala od 428HV10 što preračunato u HRC iznosi 44HRC.

5. ZAKLJUČAK

Makroskopskom analizom uzoraka izrezanih iz alata za provlačenje aluminija nisu uočeni karakteristični tragovi koji bi ukazivali na uzrok i mehanizam loma. Mikroskopska analiza pokazala je da u materijalu ne postoje pogreške koje bi mogle ukazivati na uzrok loma, dok je analizom prijelomne površine ustanovljeno da postoje karakteristični tragovi na prijelomnoj površini koji ukazuju na mehanizam loma. U analizi uzoraka uzetih iz alata za provlačenje aluminija utvrđeno je da je mehanizam loma krhki lom. Mjerenjem mikrotvrdoće utvrđeno je da mikrotvrdoća nitriranog sloja uzorka 1 iznosi 449HV0,2. Također je utvrđeno da je tvrdoća materijala niža od zahtjeva koji su postavljeni od strane tvrtke. Materijal od kojega je alat izrađen može postići tvrdoću od 56HRC, a tvrdoća nitriranog sloja iznosi 55HRC. Stvarna tvrdoća jezgre iznosi 44HRC. Moguće je da je alat prilikom rada popušten, što mu je smanjilo tvrdoću, a samim time i čvrstoću, ali i da je alat prilikom isporuke imao tvrdoću nižu od deklarirane. Stoga se može pretpostaviti da je uzrok loma je preveliko naprezanje na alatu nastalo prekomjernom silom djelovanja trupca na alat. Pored tvrdoće koja je niža od zahtijevane moguće je da je i temperatura trupca bila niska te je bila potrebna veća sila na klipu da bi se ostvarilo tečenje aluminija kroz alat. Stvarni uzrok loma je najvjerojatnije kombinacija ta 2 faktora, to jest niske tvrdoće alata i nedovoljnog zagrijavanja trupa. Do točnog uzroka loma nije doći jer nisu bili dostupni podatci o tlaku i temperaturi procesa koje tvrtka drži kao poslovnu tajnu.

U cilju sprječavanja budućih lomova na alatima potrebno je češće kontrolirati alat, točnije tvrdoću alata kako bi se ukoliko dođe do pada tvrdoće moglo pravovremeno vratiti alat na toplinsku obradu i izbjeći lom. Također postoji mogućnost i izrade alata od alatnog čelika veće čvrstoće kako bi pad tvrdoće u tijeku eksploatacije bio manje značajan. Radi povećanja trajnosti alata postoji mogućnost i dodatne modifikacije površine. Uz nitriranje površine moguće je provesti modifikaciju i prevlačenje površine kvalitetnijim prevlakama. Jedna od mogućnosti je prevlačenje površine TiN slojem CVD postupkom. Taj način povećanja trajnosti alata spominje se i u literaturi korištenoj za izradu rada. Nadalje potreban je i češća kontrola alatnog stroja, ponajviše komore za zagrijavanje, gdje u slučaju kvara grijaćih elemenata može doći do nedovoljnog ugrijavanja trupca i samim time povećanje tlaka na preši.

LITERATURA

[1] Aluminium Extrusion Technology, Pradio K. Saha, ASM international, 2000.

[2] Drozda Tom, Wick Charles, Bakerjian Ramon, Veilleux Raymond F., Petro Louis: "Tool and manufacturing engineers handbook: Forming",SME, 1984.

[3] http://collenvis.blogspot.com/2015/01/aluminum-foil-boat-plans.html -Preuzeto 24.9.2018.

[4] https://www.meusburger.com/EN/IN/products/mould-making/quality/material-grades/12343-12343-hot-work-steel -Preuzeto 24.10.2018.

[5]http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dbedea524d8b43febd2c444aa10da9a1&ckck=1 -Preuzeto 24.10.2018.

[6] Obrada materijala II, dipl. ing. strojarstva Ivo Slade, www.cnt.tesla.hr, 2012.

[7] Rezanje mlazom vode, Hloch, Sergej; Valíček, Jan; Stoić, Antun; Kozak, Dražan; Samardžić, Ivan; Novak – Marcinčin, Jozef; Modrak, Vladimir, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku, bib.irb.hr, 2011.

[8] https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje_vodenim_mlazom#cite_note-1 Preuzeto 24.10.2018.

[9] Krumes, D., Toplinska obrada, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.

[10] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, Ispitna metoda, Narodne novine, Zagreb, 1999

PRILOZI

I CD-R disc