

# Karakterizacija materijala kalupa za injekcijsko prešanje polimera

---

**Antunović, Ana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:235:797980>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ana Antunović**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Ana Antunović

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stjecana tokom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na prihvaćanju mentorstva, savjetima, razumijevanju, utrošenom vremenu i trudu prilikom pisanja rada.

Zahvaljujem asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na pomoći, trudu i savjetima tijekom pisanja rada.

Zahvaljujem tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom studija.

Ana Antunović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Ana Antunović**

JMBAG: **0035228153**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala kalupa za injekcijsko prešanje polimera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of mold material for injection molding of polymers**

Opis zadatka:

Kalupi za injekcijsko prešanje polimernih materijala u svom radu izloženi su mehaničkim, tribološkim, i toplinskim naprezanjima. Čelici koji se koriste za izradu ovih kalupa uglavnom se primjenjuju na temperaturama iznad 200 °C i na tim temperaturama trebaju zadržati svoja osnovna svojstva. Pravilnim izborom vrste čelika i dobrim konstrukcijskim rješenjem uvelike se utječe na kvalitetu otpresaka.

U teorijskom dijelu završnog rada potrebno je opisati postupak injekcijskog prešanja polimernih materijala s posebnim osvrtom na opterećenja kojima su kalupi izloženi. Također je potrebno opisati materijale koji se koriste za izradu ove vrste alata.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju materijala kalupa za injekcijsko prešanje polipropilena na kojem se pojavila pukotina, koja je onemogućila njegovu daljnju primjenu. Uz analizu kemijskog sastava potrebno je provesti analizu mikrostrukture te mjerenje mikrotvrdoće. Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1 UVOD.....	1
2 INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERNIH MATERIJALA .....	2
2.1 Ciklus injekcijskog prešanja polimernog materijala .....	2
2.2 Linija za injekcijsko prešanje.....	4
2.2.1 <i>Ubrizgavalica</i> .....	4
2.2.2 <i>Kalup</i> .....	5
2.2.3 <i>Temperiralo</i> .....	7
2.3 Opterećenja kojima su kalupi izloženi .....	8
2.4 Materijali za kalupe.....	9
2.4.1 <i>Čelici za cementiranje</i> .....	10
2.4.2 <i>Čelici za poboljšavanje</i> .....	11
2.4.3 <i>Čelici za nitriranje</i> .....	12
2.4.4 <i>Niskolegirani čelici</i> .....	12
2.4.5 <i>Visokolegirani čelici</i> .....	13
2.4.6 <i>Nehrđajući alatni čelici</i> .....	13
2.4.7 <i>Maraging čelici</i> .....	14
3 EKSPERIMENTALNI DIO .....	15
3.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	15
3.2 Materijal za ispitivanje.....	17

---

3.3	Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture .....	19
3.3.1	Izrezivanje uzorka .....	20
3.3.2	Zalijevanje uzoraka u polimernu masu .....	21
3.3.3	Brušenje površine metalografskih uzorka .....	22
3.3.4	Poliranje .....	23
3.3.5	Nagrizanje .....	24
3.4	Analiza mikrostrukture .....	24
3.4.1	Analiza mikrostrukture u poliranom stanju .....	24
3.4.2	Analiza mikrostrukture u nagrizenom stanju .....	29
3.5	Mjerenje mikrotvrdoće uzorka .....	35
4	OSVRT NA REZULTATE .....	37
4.1	Osvrt na rezultate analize mikrostrukture .....	37
4.2	Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće .....	38
5	ZAKLJUČAK .....	40
	LITERATURA .....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Poklopac od polipropilena dobiven injekcijskim prešanjem.....	2
Slika 2.	Jednostavniji prikaz sustava injekcijskog prešanja [6].....	4
Slika 3.	Sustav za injekcijsko prešanje [4] .....	5
Slika 4.	Kalup za injekcijsko prešanje polimera [8].....	6
Slika 5.	Uređaji za temperiranje [9].....	8
Slika 6.	Nepomični dio kalupa za injekcijsko prešanje .....	15
Slika 7.	Matrica kalupa .....	16
Slika 8.	Posuda od polipropilena .....	16
Slika 9.	TTT dijagram čelika X37CrMoV5-1[17].....	18
Slika 10.	Utjecaj temperature na tvrdoću nakon popuštanja[17].....	18
Slika 11.	Mjesto na kojem su uzeti uzorci za analizu mikrostrukture .....	19
Slika 12.	Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili .....	20
Slika 13.	Uzorci izrezani na tračnoj pili .....	21
Slika 14.	Precizna rezalica Sunnex Mecatome T260 .....	21
Slika 15.	Pneumatska preša Mecapress 3 .....	22
Slika 16.	Metalografski uzorak nakon vađenja iz preše .....	22
Slika 17.	Uređaj za brušenje i poliranje Presi Mecatech 250 SPI .....	23
Slika 18.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	24
Slika 19.	Poprečni presjek kroz stijenku kalupa uz rub pukotine, snimljen pri povećanju 50× .....	25
Slika 20.	Poprečni presjek kroz stijenku kalupa uz rub pukotine, snimljen pri povećanju 200×.....	25
Slika 21.	Vanjski rub poprečnog presjeka stijenke kalupa, snimljen pri povećanju 50× .....	26
Slika 22.	Vanjski rub poprečnog presjeka stijenke kalupa, snimljen pri povećanju 200× ...	26
Slika 23.	Unutarnji rub poprečnog presjeka stijenke matrice, snimljeno pri povećanju 50×	27
Slika 24.	Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 50× .....	27
Slika 25.	Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 200× .....	28
Slika 26.	Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 500× .....	28
Slika 27.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 50× .....	29
Slika 28.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 200× .....	30



Slika 29.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 50× .....	30
Slika 30.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 200× .....	31
Slika 31.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 500× .....	31
Slika 32.	Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 50× .....	32
Slika 33.	Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 200× .....	32
Slika 34.	Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 500× .....	33
Slika 35.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz unutarnji rub, dalje od pukotine, snimljeno pri povećanju 50× .....	33
Slika 36.	Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz unutarnji rub, dalje od pukotine, snimljeno pri povećanju 200× .....	34
Slika 37.	Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće .....	35
Slika 38.	Pozicije izmjerene tvrdoće .....	36
Slika 39.	Usporedba mikrostrukture matrice kalupa (a) s mikrostrukturom iz literature [19] .....	37
Slika 40.	Mogući oblici karbida u čeliku X37CrMoV5-1 [19] .....	38
Slika 41.	Srednja vrijednost izmjerenih mikrotvrdoća .....	39

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Čelici za cementiranje [8].....	11
Tablica 2. Čelici za poboljšavanje [8].....	11
Tablica 3. Čelici za nitriranje [8].....	12
Tablica 4. Niskolegirani čelici [8].....	12
Tablica 5. Visokolegirani čelici [8].....	13
Tablica 6. Nehrdajući čelici [8].....	14
Tablica 7. Kemijski sastav čelika oznake X37CrMoV5-1 (1.2343) [15].....	17
Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2.....	36

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
HRC	/	Tvrdoća po Rockwellu (dijamantni stožac)
HV	/	Tvrdoća po Vickersu
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja

## **POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
PVC	Poli(vinil-klorid)

## **SAŽETAK**

U završnom radu provedena je karakterizacija materijala u području pukotine na alatu za injekcijsko prešanje polimera. Matrica kalupa izrađena je od čelika oznake X37CrMoV5-1.

U teorijskom dijelu rada, opisan je postupak injekcijskog prešanja polimera, navedeni su materijali koji se najčešće koriste za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimera te opterećenja kojima je kalup izložen.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza mikrostrukture i izmjerena je mikrotvrdoća HV<sub>0,2</sub> na materijalu u blizini pukotine koja se pojavila na matrici kalupa, i dalje od pukotine.

Pri većim povećanjima na svjetlosnom mikroskopu, uz pukotinu su uočene manje pukotine koje se šire dublje u materijal te korozijski produkti na površini. Mikrostruktura čelika sastavljena je od martenzita i sitnih karbida koji se ne vide na svjetlosnom mikroskopu. Nije uočena razlika u mikrostrukтури uz pukotinu i dalje od pukotine.

Uz pukotinu su izmjerene više vrijednosti mikrotvrdoće, nego dalje od pukotine. Najviše vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su uz pukotinu, na unutarnjem rubu stijenke matrice (756 HV<sub>0,2</sub>).

**Ključne riječi:** karakterizacija, injekcijsko prešanje, kalup, pukotina

## **SUMMARY**

In the thesis, the characterization of the material in the area of the crack on the polymer injection molding tool was performed. The mold matrix is made of X37CrMoV5-1 steel.

In the theoretical part of the work, the process of injection molding of polymers is described, the materials most often used for making molds for injection molding of polymers and the loads to which the mold is exposed are listed.

In the experimental part of the work, the analysis of microstructure was performed and the microhardness HV0.2 was measured on the material near the crack that appeared on the mold matrix and away from the crack.

At higher magnifications on the light microscope, smaller cracks that spread deeper into the material and corrosion products on the surface were observed along with the crack. The microstructure of steel is composed of martensite and small carbides that cannot be seen under a light microscope. No difference was observed in the microstructure along the crack and away from the crack.

Higher microhardness values were measured near the crack than further away from the crack. The highest microhardness values were measured next to the crack, on the inner edge of the matrix wall (756 HV0.2).

**Keywords:** injection molding, mold, polymers, characterization

## 1 UVOD

Prvi stroj za injekcijsko prešanje patentiran je 1872. godine. Osmislili su ga braća Hyatt i vjerojatno nisu pretpostavljali kako će njihov izum utjecati na svijet. Strojevi za injekcijsko prešanje pokrenuli su svjetsku proizvodnju koja zapošljava milijune ljudi, a glavni čimbenik za daljnji razvoj postupka za injekcijsko prešanje bila je globalizacija tržišta [1].

Injekcijsko prešanje je proizvodni proces široko korišten u automobilske industriji, industriji električne opreme te građevinske industriji. Koristi se za proizvodnju različitih predmeta, od igračaka i plastičnog nakita do automobilskih dijelova, boca za vodu i maskica mobitela. U postrojenju za injekcijsko prešanje kalup ima važnu ulogu. Za njegovo konstruiranje potrebno je uložiti napor kako bi se kasnije maksimalno izbjegle komplikacije i zastoji u radu. Jedna od središnjih faza razvoja kalupa je izbor optimalnog materijala. Pomno treba pripaziti na svojstva materijala s obzirom na uvjete u kojima bi kalup trebao raditi. Izrada kalupa je vrlo komplicirana i skupa, a cijena materijala nema veliki udio u ukupnoj cijeni kalupa. Puno važniji čimbenici pri izboru materijala su mehanička, tribološka, toplinska i korozivna svojstva materijala. Osim ovih eksploatacijskih čimbenika vrlo su važni i izradbeni čimbenici među kojima su rezljivost, deformabilnost, toplinska obradivost i prikladnost materijala za ostale završne obrade površine. Pri izboru optimalnog materijala od kojeg će se izraditi kalup za injekcijsko prešanje plastomera treba uzeti u obzir vrstu prerađivanog plastomera, oblik, dimenzije i količinu te kvalitetu proizvoda [2,3].

Kada se radi o velikoserijskoj proizvodnji kao materijal za kalupe za injekcijsko prešanje polimera najčešće se koriste čelici. Za manje serije koriste se drugi metalni materijali kao što su aluminijske legure, legure bakra, cinka i dr. [2].

Zbog različitih razloga u eksploataciji može doći do manjeg ili većeg oštećenja dijelova kalupa. Ponekad su uzroci nastanka tih oštećenja jasni, a ponekad nisu. Različite metode karakterizacije materijala mogu pomoći u otkrivanju uzroka nastanka navedenih oštećenja kako bi se spriječili zastoji u proizvodnji i poboljšala eksploatabilnost kalupa.

## 2 INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERNIH MATERIJALA

Među najistaknutijim postupcima prerade polimera izdvaja se postupak injekcijskog prešanja. To je ciklički postupak kojim se mogu proizvoditi različiti dijelovi. Rastaljeni materijal ubrizgava se u kalup, a nakon umrežavanja i hlađenja iz kalupne šupljine vadi se dobiveni proizvod ili otpresak. U jednom ciklusu prešanja dobiva se proizvod koji je potpuno dovršen i primjenjiv odmah ili je potrebno provesti neku malu dodatnu obradu. Najčešće se izrađuju pojedinačni proizvodi, međutim ukoliko dimenzije proizvoda dopuštaju u kalup se smještaju jedan ili više njih te se istodobno dobiva više proizvoda tj. otpresaka. Ciklus rada se ponavlja zavisno o potrebi proizvodnje proizvoda, a glavna prednost injekcijskog prešanja je mogućnost automatizacije proizvodnje. Nerijetko se govori o velikoserijskoj proizvodnji kako bi bila isplativa visoka cijena opreme. Injekcijskim prešanjem dobivaju se proizvodi koji se razlikuju po svojoj složenosti, veličini i primjeni [2].

Na slici 1. prikazan je proizvod dobiven injekcijskim prešanjem polimernog materijala.



**Slika 1. Poklopac od polipropilena dobiven injekcijskim prešanjem**

### 2.1 Ciklus injekcijskog prešanja polimernog materijala

Za izradu otpreska, tijekom kojeg se obavlja niz operacija, potrebno je vrijeme. Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja polimernih materijala je kratko, najčešće između 2 sekunde i 2 minute [4].



Osnovni koraci u procesu injekcijskog prešanja su:

- 1 zatvaranje kalupa
- 2 ubrizgavanje
- 3 hlađenje
- 4 izbacivanje obratka [4].

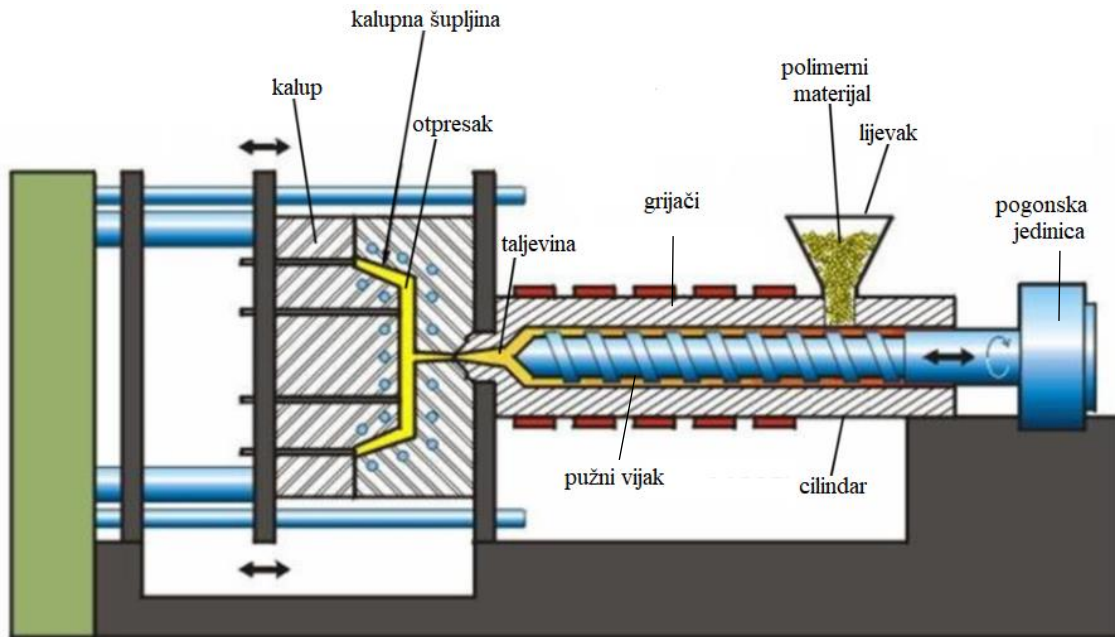
1. Zatvaranje kalupa - Na samom početku injekcijskog prešanja potrebno je zatvoriti kalup od strane jedinice za zatvaranje kalupa. Svaka polovica kalupa pričvršćena je za stroj za injekcijsko prešanje te je jedna strana kalupa nepomična, a drugoj strani je dopušteno pomicanje. Dok se materijal ubrizgava u kalupnu šupljinu jedinica za zatvaranje kalupa daje dovoljno snage da kalup drži zatvorenim [4].

2. Ubrižgavanje - Materijal, najčešće neka vrsta polimera u obliku granula ili praha, ulazi kroz lijevak u cilindar za taljenje. Cilindar se zagrijava na potrebnu temperaturu uz pomoć grijača. Pužni vijak se rotira uz pomoć hidromotora i zahvaća materijal. Zbog djelovanja tlaka i topline materijal se rastapa. Nakon šta se postigne dovoljno rastaljenog materijala pužni vijak se pomiče prema naprijed pomoću hidrauličkog cilindra, pri čemu počinje brizganje taljevine kroz mlaznicu u kalup [4,5].

3. Hlađenje - Nakon ubrizgavanja dolazi do faze naknadnog tlaka. Ona omogućuje zadržavanje dimenzija obratka, kako se ne bi poremetile zbog stezanja materijala. Kako bi se otpresak mogao sigurno izvaditi iz kalupne šupljine, bez sniženja kvalitete otpreska, potrebno je osigurati dovoljno vrijeme hlađenja. Ono se određuje po maksimalnoj debljini otpreska i prema termodinamičkim svojstvima polimera [4].

4. Izbacivanje - Nakon što je otpresak ohlađen, kalup se otvara i pomoću izbacivača izbacuje proizvod iz kalupa. Proizvod tj. otpresak dalje preuzima robot ili čovjek, ovisno o stupnju automatizacije sustava [4].

Na slici 2. prikazana je jednostavnija shema postupka injekcijskog prešanja.



Slika 2. Jednostavniji prikaz sustava injekcijskog prešanja [6]

## 2.2 Linija za injekcijsko prešanje

Za postupak injekcijskog prešanja potrebna je i preradbena linija koju sačinjavaju:

- sustav za injekcijsko prešanje
- dodatna oprema koja obuhvaća elemente rukovanja tvarima i/ili materijalom i proizvodom [7].

Elementi sustava za injekcijsko prešanje su:

- ubrizgavalica
- kalup
- temperiralo.

Dodatna oprema povećava efikasnost procesa, ali ne utječe na sam proces u smislu izrade proizvoda i služi uglavnom za transport otpresaka [7].

### 2.2.1 Ubrizgavalica

Ubrizgavalica je univerzalni element sustava jer se njome može unutar njezinih zadanih izmjera i kapaciteta izrađivati veliki broj različitih otpresaka [7].

Osnovni zadatci koje ubrizgavalica mora ostvariti su:

- priprema taljevine za ubrizgavanje
- ubrizgavanje taljevine u kalup

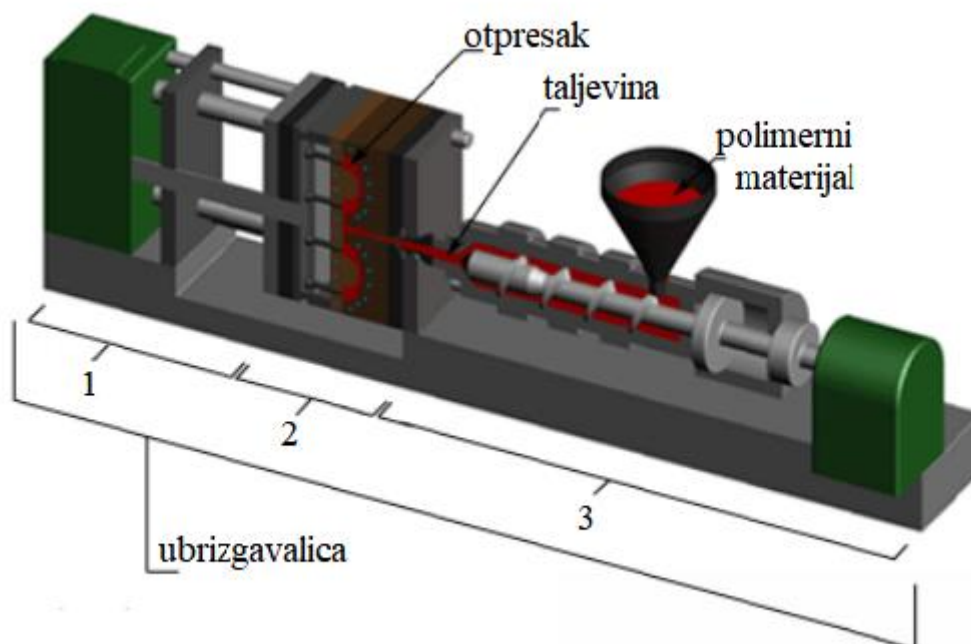
- otvaranje i zatvaranje kalupa
- vađenje otpreska [7].

Ubrizgavalica se sastoji od četiri zasebne jedinice:

- jedinice za pripremu i ubrizgavanje taline
- jedinice za zatvaranje kalupa
- pogonske jedinice
- jedinice za vođenje procesa [7].

Uz navedene jedinice važan dio ubrizgavalice je i uređaj za zaštitu radnika.

Na slici 3. prikazane su jedinice od kojih se sastoji ubrizgavalica, pod brojem 1 je jedinica za zatvaranje kalupa, pod brojem 2 jedinica za vođenje procesa i pod brojem 3 jedinica za pripremu taljevine i ubrizgavanje [7].



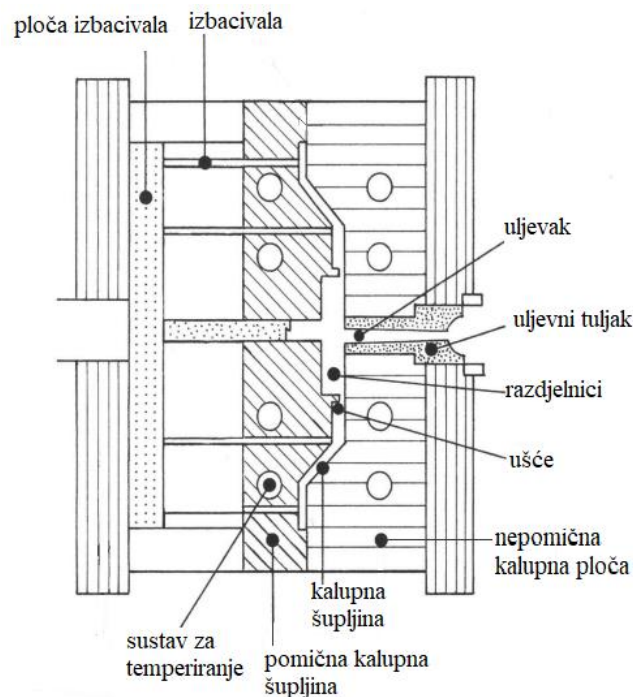
Slika 3. Sustav za injekcijsko prešanje [4]

### 2.2.2 Kalup

Kalup za injekcijsko prešanje je središnji, vitalni i specifični dio sustava. U usporedbi s ubrizgavalicom i temperiralom koji su univerzalni, kalup se može primijeniti samo za jedan otpresak. Zbog toga ako dođe do kvara neke od funkcija temperirala ili ubrizgavalice postoji

mogućnost zamjene. Kod kalupa ako dođe do kvara nema zamjene već ga se mora popravljati ili izraditi novi te time dolazi do zastoja sustava. Zbog kompliciranosti i kompleksnosti sustava kalupa potrebno je posebnu pozornost staviti na njegovo dobro konstruiranje. To može utjecati na povećanje cijene sustava kalupa, ali kako se kod injekcijskog prešanja radi o velikoserijskoj proizvodnji, ipak se isplati. Dobrom konstrukcijom kasnije se znatno utječe na pravilnost i kvalitetu otpresaka [2].

Na slici 4. prikazan je kalup za injekcijsko prešanje polimera.



Slika 4. Kalup za injekcijsko prešanje polimera [8]

Temeljne parcijalne funkcije kalupa su:

- razdijeliti taljevinu
- oblikovati taljevinu
- održavati propisano temperaturno polje
- odzračiti kalupnu šupljinu
- izvaditi grozd (otpresak s uljevnim sustavom)

Za svaku od ovih funkcija može se odrediti par konstrukcijskih rješenja [2].

Podsustavi kalupa su:

- kalupna šupljina
- kućište

- uljevni sustav
- sustav za temperiranje
- sustav za vađenje otpresaka iz kalupa
- sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa
- sustav za odzračivanje kalupa [2].

### 2.2.3 *Temperiralo*

Temperiralo ili uređaj za temperiranje koristi se za osiguranje propisane temperature stijenke kalupne šupljine. Time se osigurava smanjenje škarta te ujednačeniji parametri procesa prerade. Općenito postoji podtlačno i predtlačno temperiranje, a s obzirom na elemente sustava za temperiranje razlikuju se:

- temperirala pomoću medija
- elektrootporno
- indukcijsko
- poluvodičko temperiranje [2].

Kod kalupa za injekcijsko prešanje polimera najčešće se koristi temperiranje pomoću medija za temperiranje. To mogu biti voda, ulje, vodena para ili plin. Voda se koristi pri atmosferskom tlaku između njezinog leđišta i vrelišta. Ona je jednostavnije sredstvo, koje se danas češće koristi. Međutim, negativne strane vode su njeno konstantno poskupljenje, taloženje kamenca i ograničenje s rasponom temperatura. Ulje se koristi kao medij pri višim temperatura, tj. temperaturama iznad vrelišta vode, pri čemu su baš zbog višeg vrelišta bolja sintetička ulja od mineralnih. Pri nižim temperaturama koriste se rashladni strojevi [9].

Na slici 5. vide se dva uređaja za temperiranje pomoću ulja, za temperature do 300 °C.



Slika 5. Uređaji za temperiranje [9]

### 2.3 Opterećenja kojima su kalupi izloženi

Klupi za injekcijsko prešanje polimernih materijala u svom radu su izloženi mehaničkim, tribološkim, toplinskim i korozijskim naprezanjima. Pri razvoju kalupa za injekcijsko prešanje treba voditi računa o izboru materijala za elemente kalupne šupljine, napraviti precizan reološki i toplinski proračun kalupa te mehanički proračun koji uključuje kinematiku i dimenzioniranje elemenata kalupa [2].

Glavni zahtjevi koji se postavljaju na svojstva materijala za dijelove kalupa za preradu polimera su:

- sposobnost da se materijal polira do visokog sjaja
- korozijska postojanost
- otpornost na trošenje [10].

Naprezanja koja se javljaju kod kalupa za preradu polimera su sljedeća:

- tribološka - abrazija i adhezija
- korozija radnih površina kalupa, ako se koriste kemijski agresivni polimeri poput PVC-a
- toplinska naprezanja zbog temperaturnih oscilacija
- kratkotrajna udarna naprezanja [10].

Toplinska naprezanja su uglavnom zanemariva budući da radne temperature kalupa za preradu polimera najčešće ne prelaze temperaturu od 200 °C. Stoga su alatni čelici za hladni rad često primjenjivani za izradu kalupa [11].

Mehanička naprezanja koja se pojavljuju kod ovih kalupa mogu se okarakterizirati kao udarna. Najčešće se takva naprezanja pojavljuju i intenziviraju kada ubrizgavalica već ima veliku zračnost u svojem mehanizmu za otvaranje i zatvaranje [11].

Polimerni materijal koji se koristio kod kalupa koji je ispitan u eksperimentalnom radu je polipropilen. On je termoplast bez korozivnih i abrazivnih komponenata pa nema izražen negativan abrazijski i kemijski utjecaj na površinu kalupa [1].

## 2.4 Materijali za kalupe

Posebna pozornost kod konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje polimera posvećuje se odabiru optimalnog materijala. Izbor materijala je složen proces budući da materijal mora zadovoljavati mnoge uvjete. Kako je izrada kalupa dugotrajna, komplicirana i skupa, cijena materijala najčešće ne predstavlja značajnu ulogu u cijeni kalupa [12].

Pri izboru optimalnog materijala za ovu vrstu kalupa postoje kriteriji koji se mogu podijeliti u skupine primarnih, eksploatacijskih i tehnoloških čimbenika [12].

Primarni čimbenici:

1. vrsta prerađivanog plastomera
2. postupak prerade
3. oblik i dimenzije otpreska
4. količina otpreska
5. proizvodnost kalupa i kvaliteta proizvoda
6. postupak kojim se izrađuje kalupna šupljina [12]

Eksploatacijski čimbenici:

1. mehanička svojstva
2. tribološka svojstva
3. toplinska svojstva
4. korozivna postojanost [12]

Tehnološki čimbenici:

1. kemijski sastav materijala
2. rezljivost

3. deformabilnost
4. zavarljivost
5. toplinska obradivost
6. prikladnost za ostale završne obrade površine [12]

Materijali koji se najčešće koriste za izradu kalupne šupljine i kalupa kada se radi o velikoserijskoj proizvodnji su čelici. Kod manjih serija koriste se legure aluminija, mjed i legure cinka. Otpresci s finim detaljima mogu se postići primjenom kalupa koji su izrađeni od legura cinka i berilijevih bronci [12].

Najčešći se za izradu elemenata kalupa koriste sljedeći čelici:

- za cementiranje
- za poboljšavanje
- za nitriranje
- alatni niskolegirani
- alatni visokolegirani
- nehrđajući alatni
- maraging čelici [8].

Od ostalih materijala za izradu kalupa koriste se:

- čelični ljevovi
- Cu-legure
- Al-legure
- Zn-legure i dr. [8].

#### **2.4.1 Čelici za cementiranje**

Čelici za cementiranje sadrže nizak udio ugljika i zbog toga nisu konvencionalno zakaljivi dok se ne povrgnu cementiranju. Cementiranje se sastoji od pougljičavanja površinskih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Površinski slojevi u fazi pougljičavanja se obogate ugljikom i nakon kaljenja i popuštanja su tvrđi zbog visokougljičnog martenzita. Također su otporni na trošenje. Jezgra, ovisno o debljini i brzini hlađenja, je nepotpuno ili potpuno prokaljena te može biti feritno-perlitna (kod nepotpune prokaljenosti) ili niskougljično-martenzitna (kod potpune prokaljenosti). Žilava je i otporna je na udarna opterećenja, a ima i dobru dinamičku izdržljivost. U tablici 1. navedeni su čelici za cementiranje koji se koriste za izradu kalupa za injekcijsko prešanje i njihova tvrdoća po HRC metodi [12].



Tablica 1. Čelici za cementiranje [8]

Čelici za cementiranje		
Oznaka čelika	Brojčana oznaka	Tvrdoća HRC
C15E	1.1141	61
15Cr3	1.7015	60
16MnCr5	1.7131	57
20MnCr5	1.7147	61
15CrNi6	1.5919	60
15NiCr13	1.5752	60

#### 2.4.2 Čelici za poboljšavanje

Ovi čelici sadrže više ugljika od čelika za cementiranje (do 0,6 %) i primjenjuju se u poboljšanom stanju. Poboljšavanje je toplinska obrada koja se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Cilj postupka poboljšavanja je da čelik dobije visoku granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, žilavost i dinamičku izdržljivost. Zbog navedenih svojstava ovi čelici se primjenjuju za dinamički opterećene dijelove strojeva, a mogu se primijeniti i izradu kalupa. Mogu biti ugljični i niskolegirani. Jedan od čelika koji se često koristi za izradu kalupa za injekcijsko prešanje je niskolegirani čelik oznake 30CrMoV9. Kao čelici za kalupe koriste se čelici 40CrMnMo7 i 40CrMnMoS8-6 [8,12].

U tablici 2. navedeni su čelici za poboljšavanje koji se koriste za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala.

Tablica 2. Čelici za poboljšavanje [8]

Čelici za poboljšavanje		
Oznaka	Brojčana oznaka	$R_{p0,2}$ , MPa
30CrMoV9	1.7707	590 – 700
40CrMnMo7	1.2311	$\geq 1034$
40CrMnMoS 8-6	1.2312	$\geq 850$

### 2.4.3 Čelici za nitriranje

Nitriranjem se poboljšavaju površinska svojstva čelika, tako da se pomoću sredstava za nitriranje, obogaćuje dušikom. Sloj nitrida, koji pri tome nastaje, otporan je na adhezijsko trošenje. Ispod sloja, dušik koji je dijelom otopljen u feritu povišuje tvrdoću [13].

U tablici 3. navedeni su čelici za nitriranje koji se koriste za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala. Svi navedeni čelici su niskolegirani.

**Tablica 3. Čelici za nitriranje [8]**

<b>Čelici za nitriranje</b>		
<b>Oznaka</b>	<b>Brojčana oznaka</b>	<b><math>R_{p0,2}</math> MPa</b>
14CrMoV6-9	1.7735	$\geq 649$
34CrAlNi7	1.8550	800 – 1000
31CrMoV9	1.8591	900 – 1100

### 2.4.4 Niskolegirani čelici

U tablici 4. prikazani su niskolegirani čelici od kojih se izrađuju kalupi za injekcijsko prešanje polimernih materijala.

Kod niskolegiranih čelika udio legiranih elemenata ne prelazi 5 %.

**Tablica 4. Niskolegirani čelici [8]**

<b>Niskolegirani čelici</b>		
<b>Oznaka</b>	<b>Brojčana oznaka</b>	<b>Tvrdoća HRC</b>
90MnCrV8	1.2842	58 – 60
102Cr6	1.2067	63 – 66
107CrV3	1.2210	62 – 64
107WCr5	1.2419	63 – 65
45WCrV8	1.2542	55 – 60

### 2.4.5 Visokolegirani čelici

Visokolegirani čelici imaju udio barem jednog legirnog elementa veći od 5%, a legiraju se najčešće kromom, niklom, molibdenom i vanadijem, s različitim udjelima pojedinog legirnog elementa. Imaju niži udio ugljika što pogoduje višoj žilavosti. Imaju dobru otpornost na popuštanje, a nakon što se zakale i popuste, pogodni su za postupak nitriranja.

U tablici 5. prikazani su visokolegirani čelici od kojih se izrađuju kalupi za injekcijsko prešanje polimera, zajedno s njihovom tvrdoćom izmjerenom metodom HRC [12].

**Tablica 5. Visokolegirani čelici [8]**

Visokolegirani čelici		
Oznaka	Brojčana oznaka	Tvrdoća HRC
45NiCrMo16	1.2767	50 – 54
X100CrMoV5	1.2363	60 – 62
X153CrMo12	1.2379	58 – 62
X210Cr12	1.2080	60 – 62
X37CrMoV5-1	1.2343	48 – 52

### 2.4.6 Nehrdajući alatni čelici

Korozivski postojani čelici se također koriste za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala, osobito onih koji su, poput PVC-a kemijski agresivni. U tablici 6. navedeni su alatni nehrđajući martenzitni čelici koji se koriste za injekcijsko prešanje, te njihova tvrdoća [12].

**Tablica 6. Nehrdajući čelici [8]**

<b>Nehrdajući čelici</b>		
<b>Oznaka</b>	<b>Brojčana oznaka</b>	<b>Tvrdoća HRC</b>
X20Cr13	1.4021	42 – 46
X41Cr13	1.2083	54 – 56
X46Cr13	1.4034	52 – 58
X38CrMo16	1.2316	48 – 52
X90CrMoV18	1.4112	50 – 60

#### **2.4.7 Maraging čelici**

Maraging čelici pripadaju skupini visokočvrstih čelika. Njihov naziv potječe od engleskih riječi “martensit aging“ što znači dozrijevanje martenzita. Po sastavu su niskougljični, sadrže manje od 0,03 % C. Ovi čelici imaju visoku čvrstoću, granicu razvlačenja i lomnu žilavost te vrlo dobra tehnološka svojstva u odnosu na ostale čelike njihove skupine. Imaju male deformacije tijekom toplinske obrade, jednostavnu obradu odvajanjem čestica i dobru hladnu deformabilnost poslije žarenja [12].

### 3 EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je karakterizacija materijala kalupa za injekcijsko prešanje polipropilena. Na kalupu se pojavila pukotina koja je onemogućila njegovu daljnju primjenu. U kalupu su izrađivane plastične posude u velikoserijskoj proizvodnji. Pukotina se pojavila na matrici kalupa koja je izrađena od visokolegiranog čelika oznake X37CrMoV5-1.

Kako bi se ispunio cilj rada provedena su sljedeća ispitivanja:

- izrezivanje i priprema reprezentativnog metalografskog uzorka
- analiza makrostrukture i mikrostrukture
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

Na slici 6. prikazan je dio kalupa za injekcijsko prešanje dvaju otpresaka istodobno. Na slici 7. vidi se matrica kalupa za injekcijsko prešanje, a na slici 8. isprešani proizvod tj. posuda od polipropilena.



Slika 6. Nepomični dio kalupa za injekcijsko prešanje



**Slika 7. Matrica kalupa**



**Slika 8. Posuda od polipropilena**

### 3.2 Materijal za ispitivanje

Prema normi HRN EN 10027-2:2015 čelik oznake X37CrMoV5-1, od kojeg je napravljen dio alata za injekcijsko prešanje, pripada skupini visokolegiranih čelika za topli rad [14].

U tablici 7. prikazan je zajamčeni kemijski sastav navedenog čelika, prema normi HRN EN 4957-2008 [15].

**Tablica 7. Kemijski sastav čelika oznake X37CrMoV5-1 (1.2343) [15]**

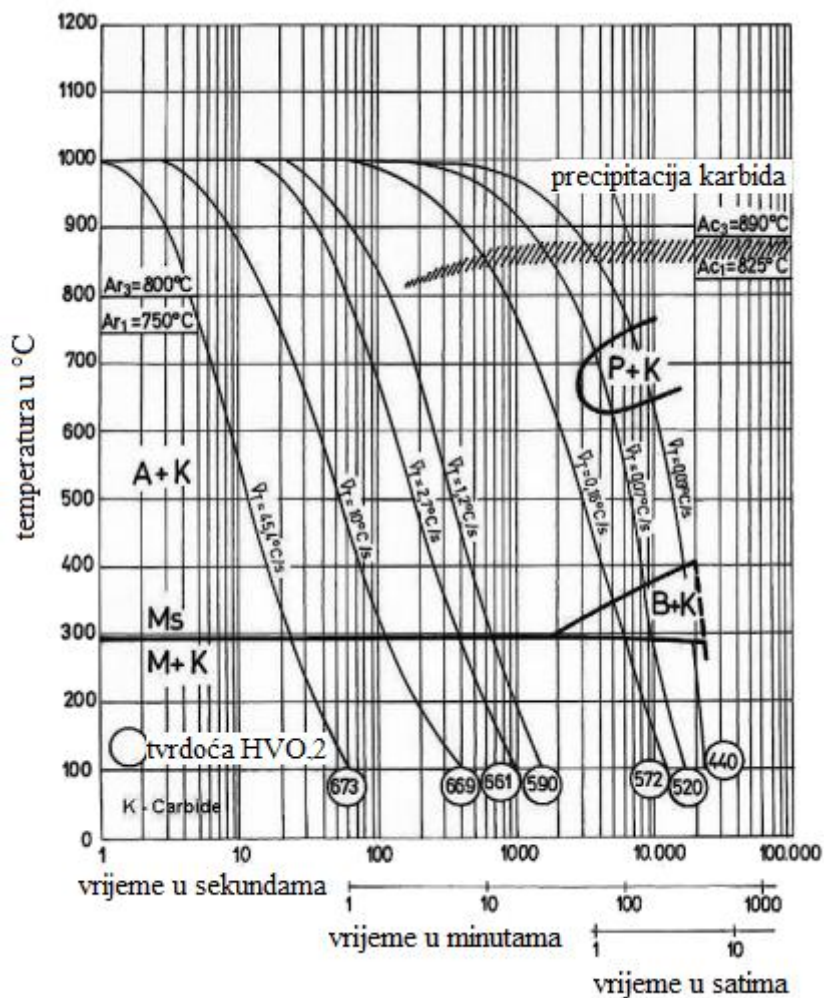
Kemijski sastav u %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
0,33 - 0,41	0,8 - 1,2	0,25 - 0,5	≤ 0,03	≤ 0,03	4,8 - 5,5	1,1 - 1,5	0,3 - 0,5	ostatak

Navedeni čelik isporučuje se iz čeličane u meko žarenom stanju, a prema bazi podataka Steel Number: European Steel and Alloy Grades propisana tvrdoća u mekožarenom stanju iznosi 229 HB [16].

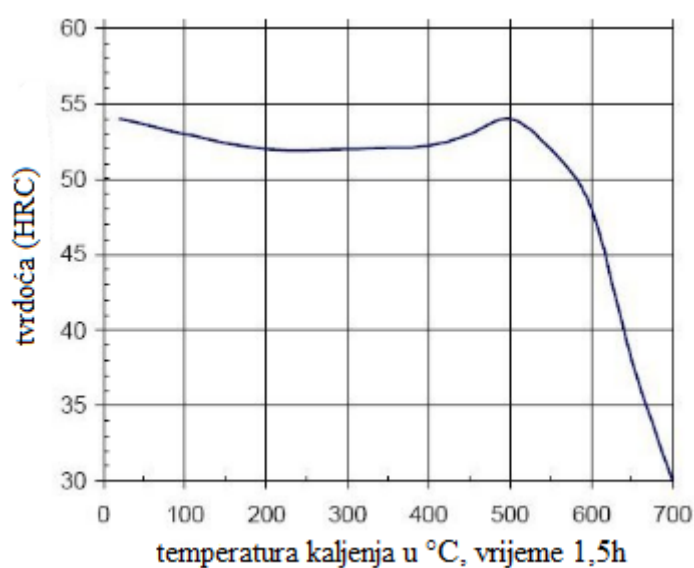
Dio kalupa na kojem je provedeno ispitivanje izrađen je iz čelične šipke odgovarajućeg promjera. Strojnom obradom, tokarenjem, matrica je obrađena na potrebne mjere. Nakon toga matrica je kaljena i popušena. Austenitizacija u svrhu kaljenja odvijala se na temperaturi između 1000 °C i 1040 °C. Nakon nadkritičnog hlađenja u uljnoj kupki, provedeno je popuštanje na 400 °C.

Na slici 9. prikazan je dijagram temperatura-vrijeme-transformacija (TTT dijagram) visokolegiranog alatnog čelika X37CrMoV5-1. Na dijagramu se vide krivulje hlađenja za različite brzine kontinuiranog ohlađivanja i mikrostrukturna stanja koja se mogu postići. S obzirom na sastav čelika, maseni udio ugljika i legiranih elemenata, mikrostruktura nakon gašenja sastoji se od martenzita i određene količine karbida.

Temperatura popuštanja određuje se prema traženim vrijednostima tvrdoće i drugih mehaničkih svojstava, slika 10. Postignuta tvrdoća nakon popuštanja iznosila je između 52 i 54 HRC. Završna obrada na konačne mjere provedena je brušenjem i poliranjem.



Slika 9. TTT dijagram čelika X37CrMoV5-1[17]



Slika 10. Utjecaj temperature na tvrdoću nakon popuštanja[17]



### 3.3 Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture

Na slici 11. prikazana je pukotina na obodu matrice. Strelicama je naznačeno područje s kojeg su uzeti uzorci za karakterizaciju materijala.



Slika 11. Mjesto na kojem su uzeti uzorci za analizu mikrostrukture

Priprema metalografskih uzoraka za analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće sastojala se od sljedećih koraka:

- izrezivanje uzoraka
- zalijevanje uzoraka u polimernu masu
- brušenje
- poliranje
- nagrivanje.

### 3.3.1 Izrezivanje uzorka

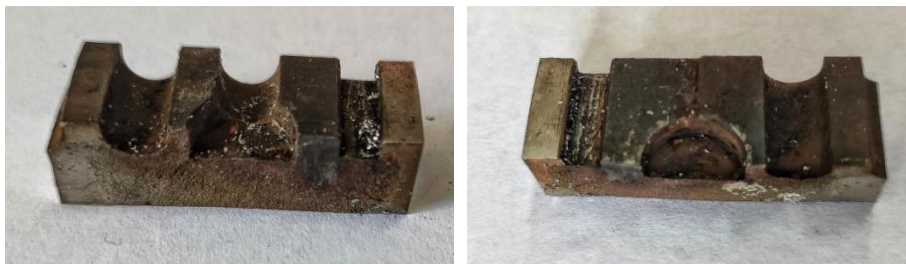
Izrezivanje uzorka provedeno je na tračnoj pili u Laboratoriju za alatne strojeve na Zavodu za tehnologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Izrezana su dva uzorka, lijevo i desno od pukotine na obodu matrice.

Na slici 12. prikazano je izrezivanje uzoraka.

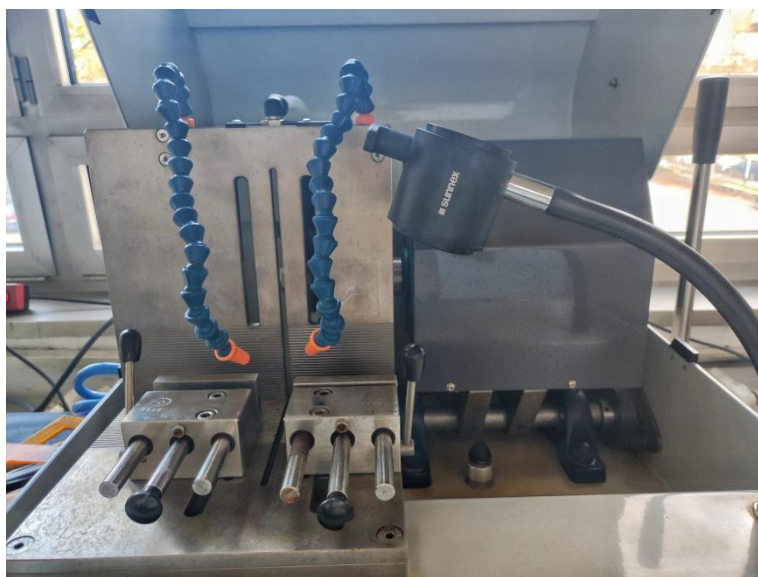


**Slika 12. Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili**

Na slici 13. prikaza su dva uzorka izrezana na tračnoj pili. Jedan uzorak je dodatno rezan na preciznijem uređaju Sunnex Mecatome T260, kako bi se mogao analizirati još jedan presjek. Uređaj je prikazan na slici 14., a nalazi se u Laboratoriju za matrijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svi sljedeći koraci pripreme metalografskih uzoraka provedeni su u istom laboratoriju.



Slika 13. Uzorci izrezani na tračnoj pili



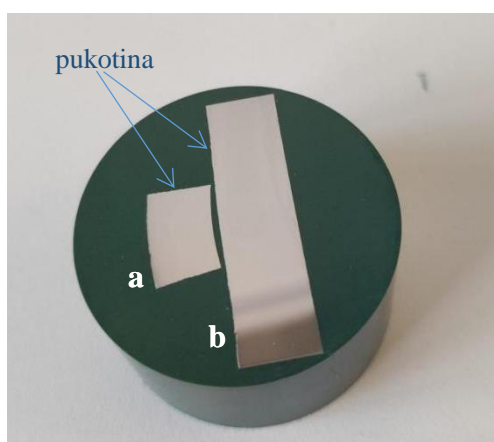
Slika 14. Precizna rezalica Sunnex Mecatome T260

### 3.3.2 Zalijevanje uzoraka u polimernu masu

Zalijevanje uzoraka u polimernu masu provodi se zbog zaštite i olakšanog rukovanja u sljedećim fazama ispitivanja. Zalijevanje uzoraka provedeno je u kalupu pneumatske preše Mecapress 3, prikazanoj na slici 15. Oba uzoraka stavljena su zajedno u isti kalup, skupa s polimernim prahom koji se pod djelovanjem visoke temperature i tlaka pretvara u uniformnu polimernu masu oblika pogodnog za daljnju pripremu uzoraka, slika 16. Na slici se mogu vidjeti oba uzorka zalivena u isti kalup. Uzorci su postavljeni tako da se može analizirati presjek stijenke kalupa u dva međusobno okomita smjera. Na manjem uzorku vidi se poprečni presjek okomit na uzdužnu os kalupa (a), a na većem uzorku vidi se uzdužni presjek kroz stijenku kalupa paralelan sa uzdužnom osi kalupa (b). Na slici je strelicama naznačen rub na kojem se nalazi pukotina.



Slika 15. Pneumatska preša Mecapress 3



Slika 16. Metalografski uzorak nakon vađenja iz preše

### 3.3.3 Brušenje površine metalografskih uzorka

Brušenje je oblikovanje materijala obradom odvajanjem čestica koja se provodi da se postigne glatka, ravna površina uzorka bez nečistoća. Postupak brušenja proveden je na uređaju za brušenje i poliranje Mecatech 250 SPI, prikazanom na slici 17. Korišteno je pet brusnih papira od grublje do finije kvalitete. Brzina okretanja brusne ploče je 300 okretaja u minuti. Tijekom procesa brušenja kontinuirano teče voda koja služi za hlađenje i podmazivanje površine

metalografskog uzorka. Površinu je potrebno ravnomjerno pobrusiti. Nakon svakog koraka uzorak se zakreće za  $90^\circ$  i brusi dok se ne otklone tragovi prethodnog koraka. Također se ispiru vodom tako da na brušenoj površini ne ostanu abradirane čestice. Brušenje započinje na brusnom papiru kvalitete P320, a nakon toga su korišteni brusni papiri oznaka P600, P1000, P2400, P4000. Za vrijeme brušenja uzorak je na površinu brusnog papira pritiskan silom od 30 N.



Slika 17. Uređaj za brušenje i poliranje Presi Mecatech 250 SPI

### 3.3.4 Poliranje

Poliranje površine uzorka provodi se nakon brušenja. Ovim postupkom se završno priprema površina uzorka za metalografsku analizu. Smanjuje se hrapavost površine i skidaju se na površini nastali oksidi. Postupak poliranja proveden je na istom uređaju kao i brušenje. Proveden je u dva koraka. Brzina okretanja diska iznosila je 150 okretaja u minuti. Kao abrazivno sredstvo u prvom koraku korištena je dijamantna pasta s česticama veličine  $3\ \mu\text{m}$ . Kao sredstvo za podmazivanje i hlađenje uzorka koristio se odgovarajući lubrikant. U drugom koraku, za poliranje površine uzorka korištena je tekućina za poliranje s abrazivnim česticama od  $0,03\ \mu\text{m}$ . Njena funkcija je i poliranje, hlađenje i podmazivanje. Sila pritiska tijekom poliranja

iznosila je 30 N. Nakon zadnjeg stupnja poliranja površina uzorka je glatka, ravna i spremna za analizu na svjetlosnom mikroskopu.

### 3.3.5 Nagrizanje

Nakon analize polirane površine uzorka provodi se nagrizanje površine uzorka kako bi se otkrila mikrostruktura materijala. S obzirom na sastav materijala uzorka, površina je nagrizana otopinom za nagrizanje poznatom pod nazivom Nital. To je 3 %-tna otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu. Uzorak se stavlja na 2 do 3 sekunde u otopinu, pri čemu dolazi do kemijske reakcije na površini uzorka. Nakon određenog vremena uzorak se vadi iz otopine, a kemijska reakcija se prekida ispiranjem s vodom. Na svjetlosnom mikroskopu provjerava se intenzitet nagrizanja i po potrebi se postupak ponavlja. Nakon toga uzorak je spreman za kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture u nagrizenom stanju.

## 3.4 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture u poliranom i nagrizenom stanju provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, prikazanom na slici 18.



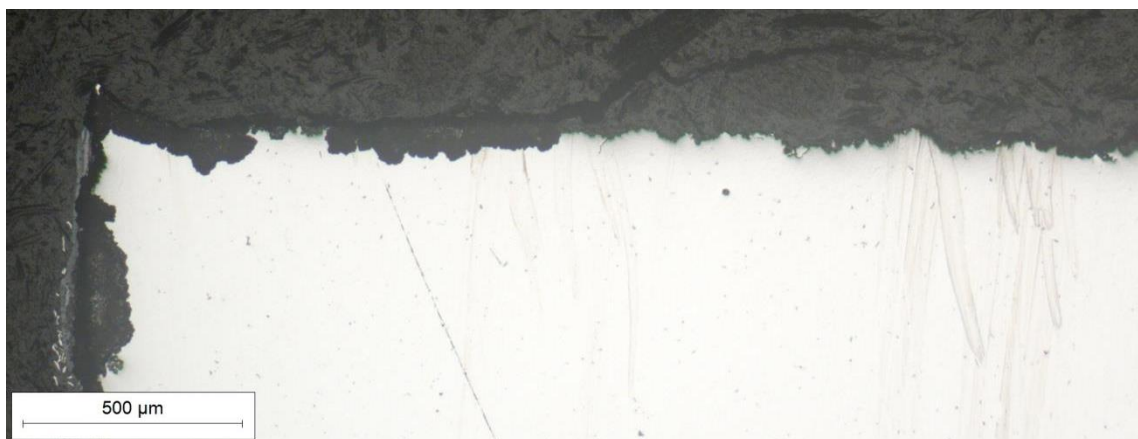
Slika 18. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

### 3.4.1 Analiza mikrostrukture u poliranom stanju

Polirana površina uzoraka analizirana je pri različitim povećanjima od 50× do 500×. U poliranom stanju puno jasnije se vide pukotine, šupljine i slične nepravilnosti u mikrostrukтури.

Posebna pozornost usredotočena je na područje oko pukotine. Analiziran je poprečni (a) i uzdužni presjek kroz stijenu matrice (b).

Na slici 19. prikazan je poprečni presjek kroz stijenu kalupa, na kojem se s gornje strane vidi rub pukotine. Na slici 20. prikazano je isto područje pri većem povećanju. Uz rub se vide sitne pukotine koje se od glavne pukotine šire u dubinu presjeka. Na obje fotografije vide se korozijski produkti po površini.

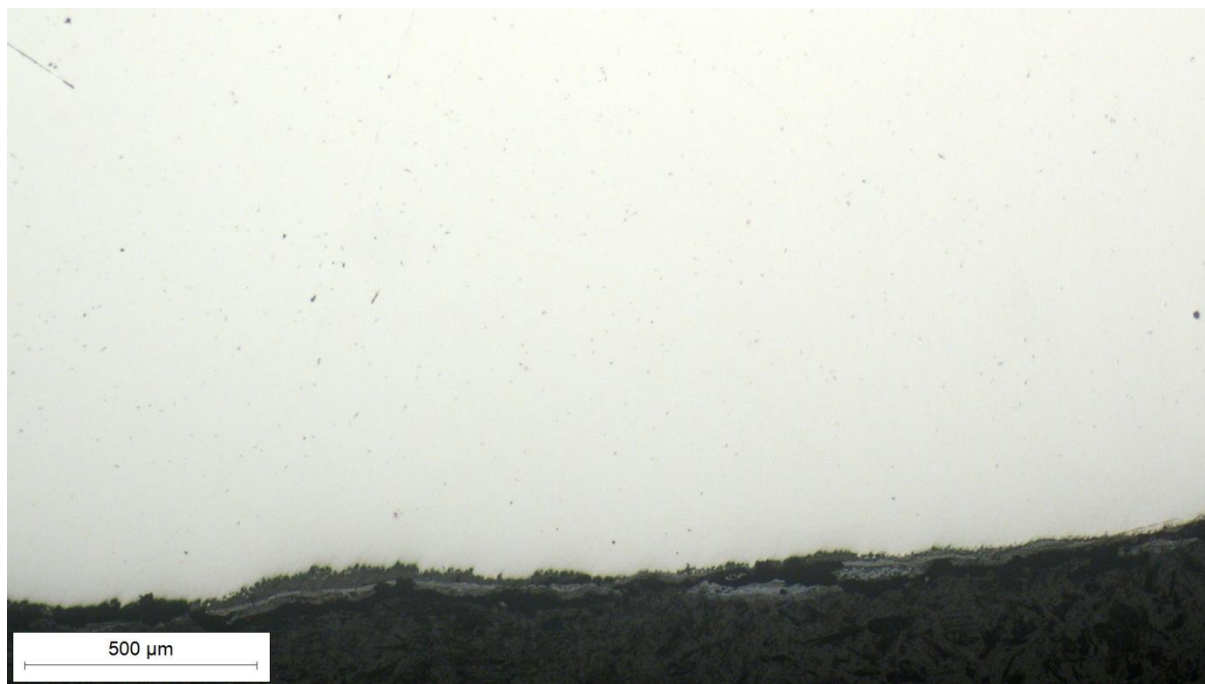


**Slika 19.** Poprečni presjek kroz stijenu kalupa uz rub pukotine, snimljen pri povećanju 50×



**Slika 20.** Poprečni presjek kroz stijenu kalupa uz rub pukotine, snimljen pri povećanju 200×

Na slici 21. prikazan je poprečni presjek kroz stijenu kalupa uz vanjski rub dalje od pukotine, snimljen pri povećanju 50×. Na površini se vide korozijski produkti. Na ovom mjestu nisu uočene pukotine. Na slici 22. prikazano je isto područje uz povećanje od 200×.



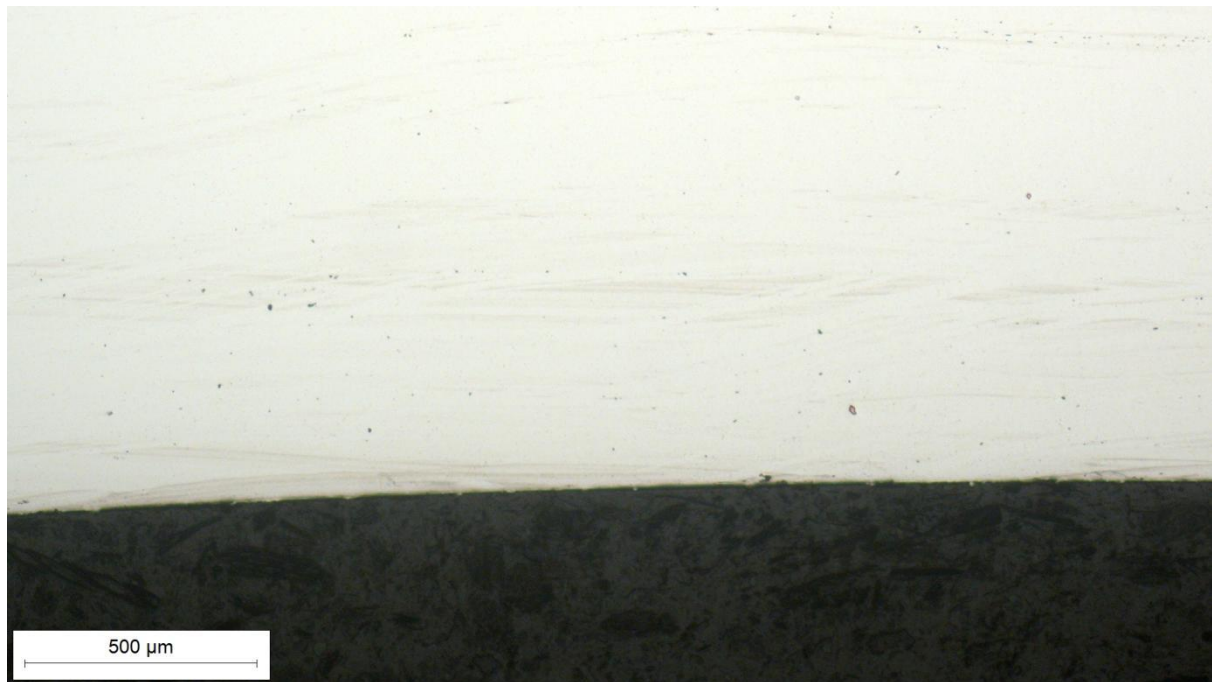
**Slika 21.** Vanjski rub poprečnog presjeka stijenke kalupa, snimljen pri povećanju 50×



**Slika 22.** Vanjski rub poprečnog presjeka stijenke kalupa, snimljen pri povećanju 200×

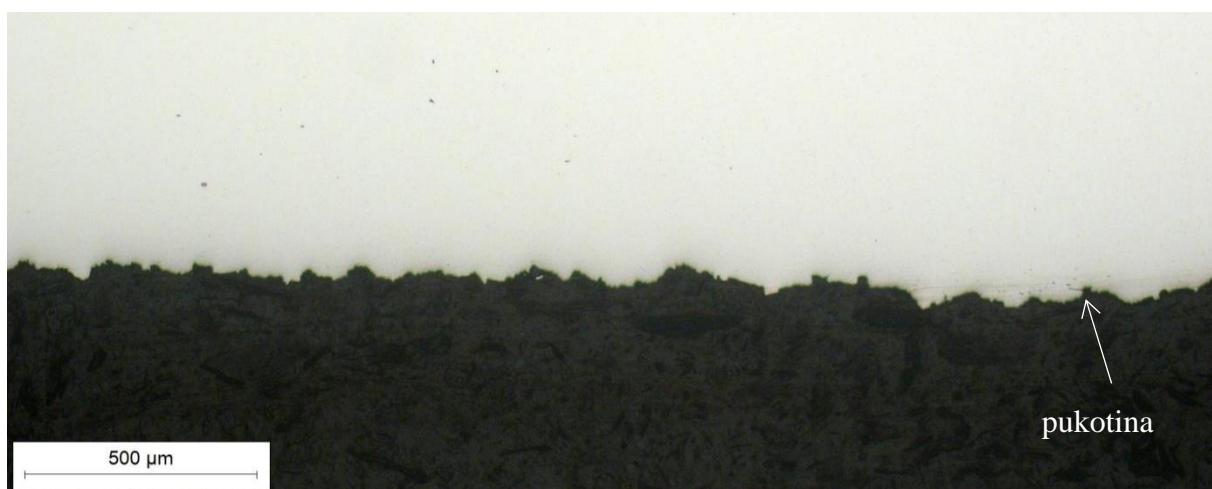
Na slici 23. vidi se poprečni presjek kroz stijenku kalupa uz unutarnji rub, snimljen pri povećanju 50×. Za razliku od vanjskog ruba ovdje se ne vide nikakvi korozijski produkti. Linija ruba je pravilna što znači da je površina relativno glatka. Iako povećanje nije veliko konkavnost površine se teško uočava.





**Slika 23.** Unutarnji rub poprečnog presjeka stijenke matrice, snimljeno pri povećanju 50×

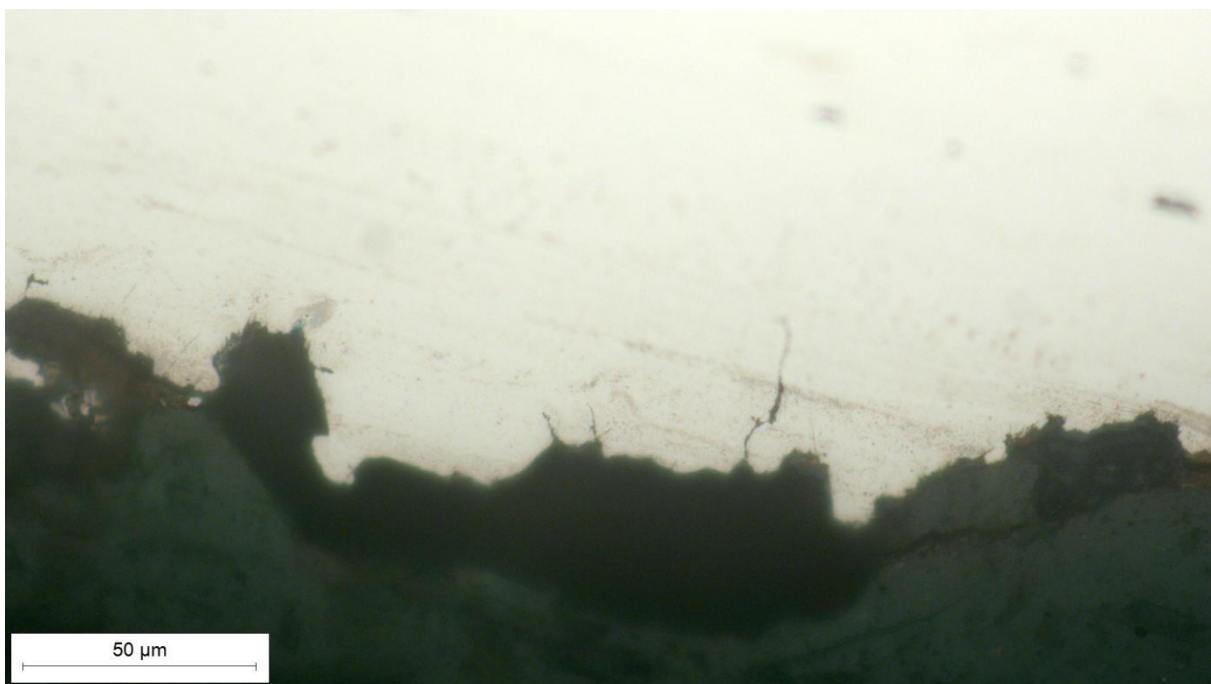
Mikrostruktura uzdužnog presjeka uz pukotinu prikazana je na slikama 24, 25 i 26, pri različitim povećanjima. Na slici 24., koja je snimljena pri povećanju 50×, vidi se nepravilna površina s jedva primjetnim pukotinama. Pri većem povećanju na slici 25. jasnije se vide pukotine koje se od glavne pukotine šire dalje u materijal. Može se uočiti i tanki sloj korozivskih produkata po cijeloj dužini osnovne pukotine. Na slici 26., snimljenoj pri povećanju 500×, mogu se jasnije vidjeti pukotine i korozivski produkti.



**Slika 24.** Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 50×



**Slika 25.** Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 200×



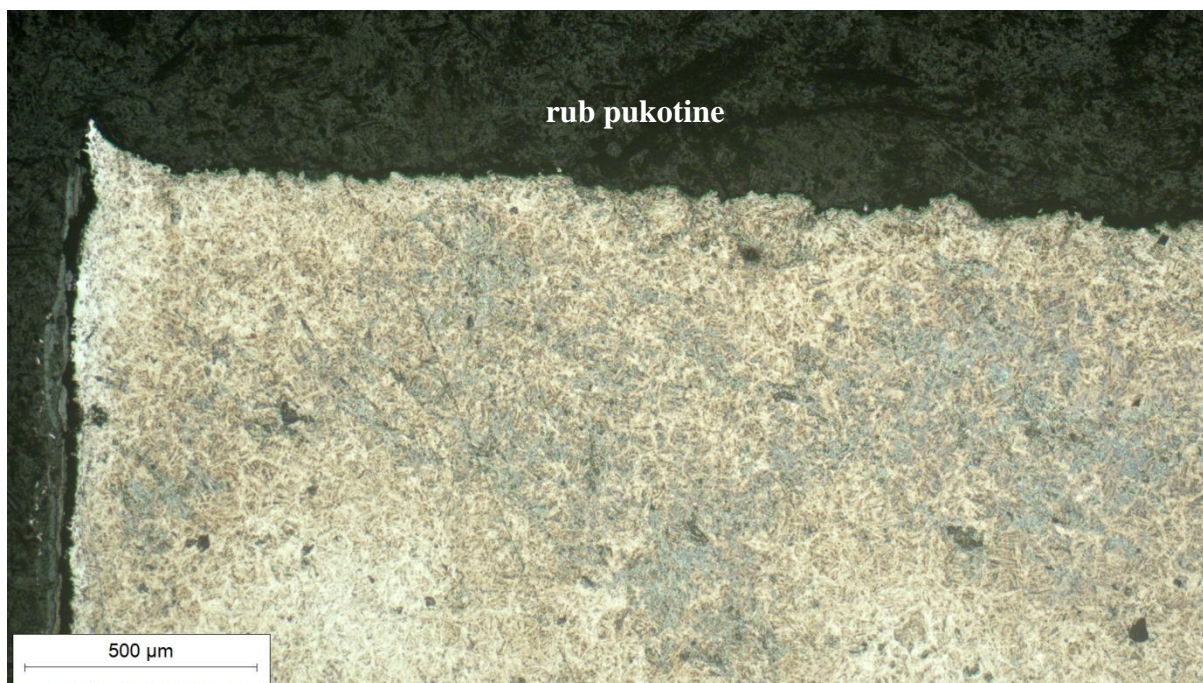
**Slika 26.** Uzdužni presjek ruba pukotine, snimljen pri povećanju 500×

### 3.4.2 Analiza mikrostrukture u nagrizenom stanju

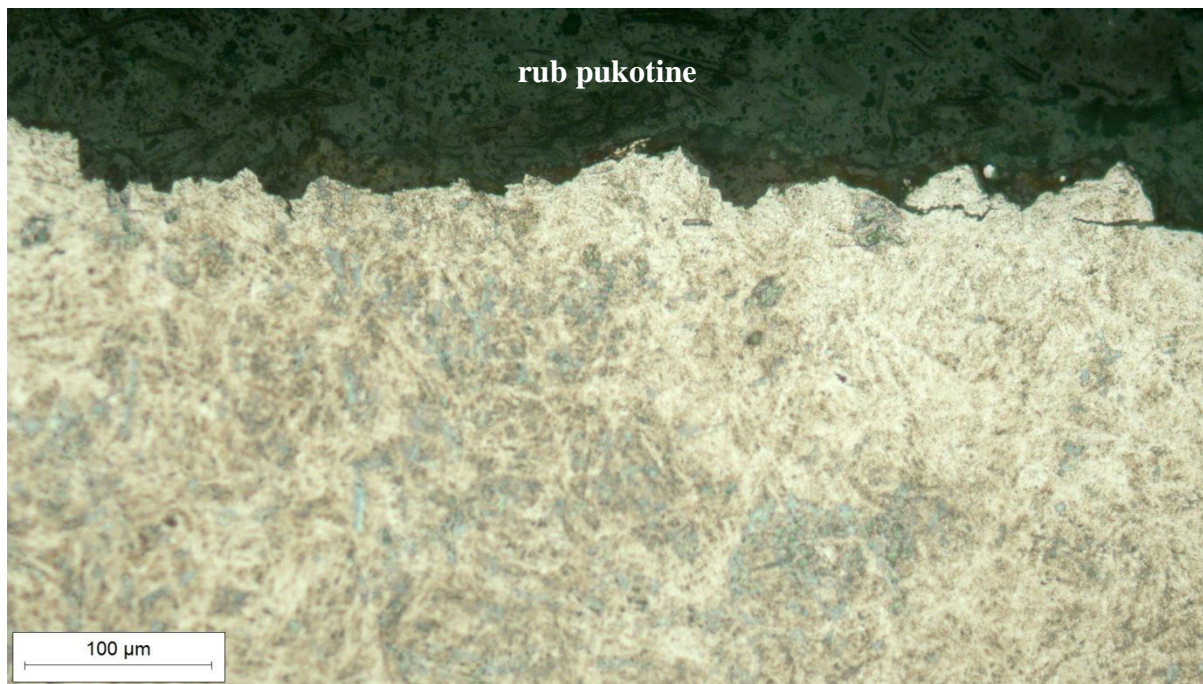
Nagrizena površina uzorka, kao i polirana, analizirana je pri različitim povećanjima od 50× do 500×. U nagrizenom stanju može se u potpunosti otkriti mikrostruktura čelika od kojeg je izrađena matrica kalupa. Analiziran je poprečni i uzdužni presjek kroz stijenku matrice u blizini nastale pukotine.

Na slici 27. prikazana je mikrostruktura na poprečnom presjeku uz rub pukotine. Na slici 28. vidi se isto područje uz veće povećanje od 200×. Mikrostruktura analiziranog čelika je martenzitna. S obzirom na kemijski sastav i provedenu toplinsku obradu, osim martenzita u mikrostrukтури je prisutna i određena količina karbida, ali se oni, zbog svoje male veličine, pri ovom povećanju ne mogu jasno uočiti. Prema literaturnim izvorima u kojima je provedena detaljnija analiza mikrostrukture istog čelika postoji mogućnost izlučivanja različitih karbida po morfologiji i po sastavu. Neki karbidi se ne otapaju na temperaturi austenitizacije i prisutni su nakon kaljenja čelika, a neki se izlučuju tijekom faze popuštanja, ovisno o temperaturi popuštanja [18, 19].

I u nagrizenom stanju vide se sitne pukotine koje se šire od ruba glavne pukotine, ali su slabije izražene nego u poliranom stanju.

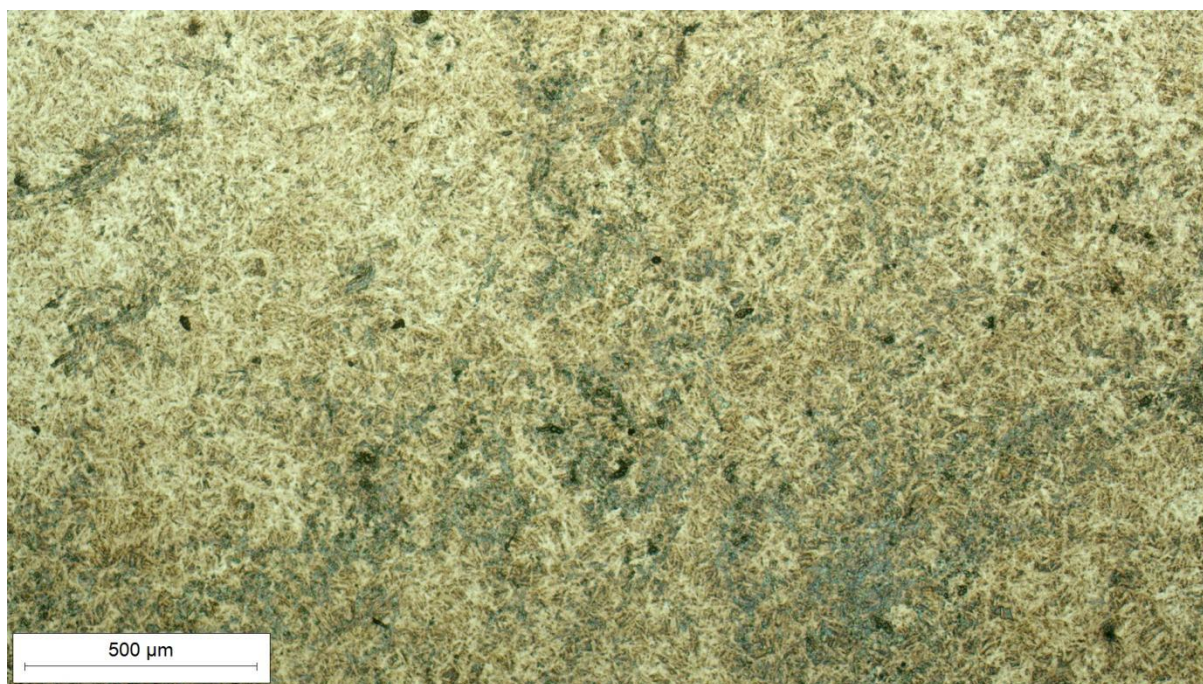


**Slika 27. Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 50×**

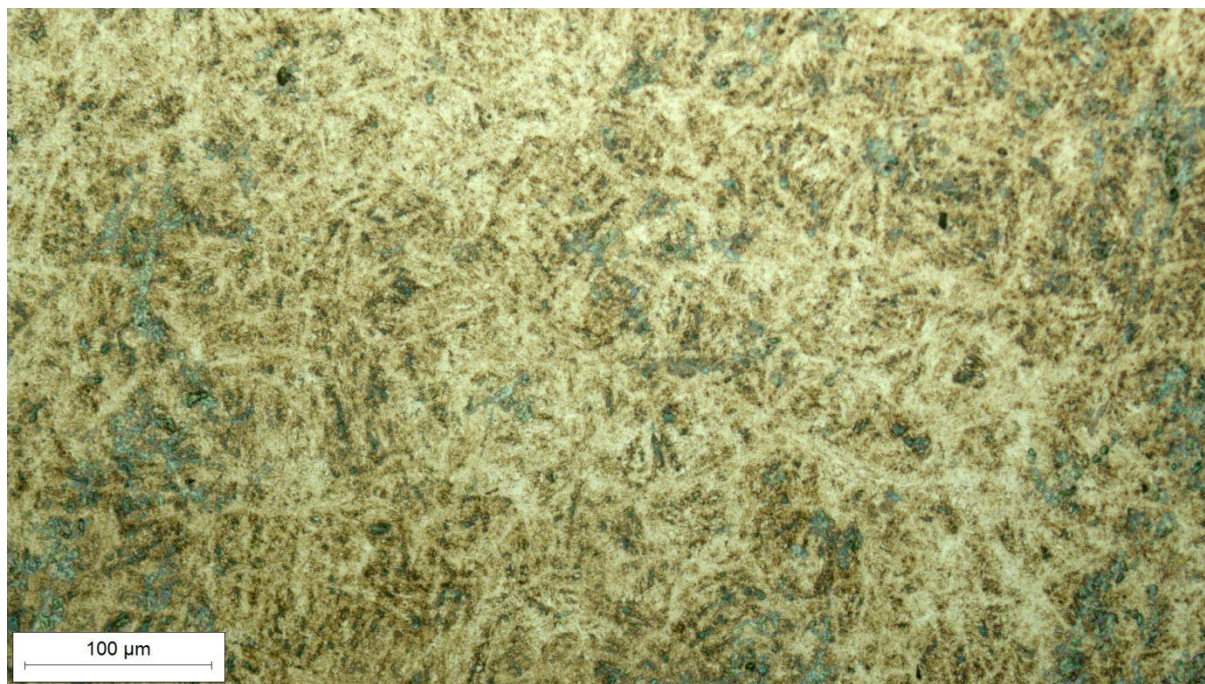


**Slika 28.** Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 200×

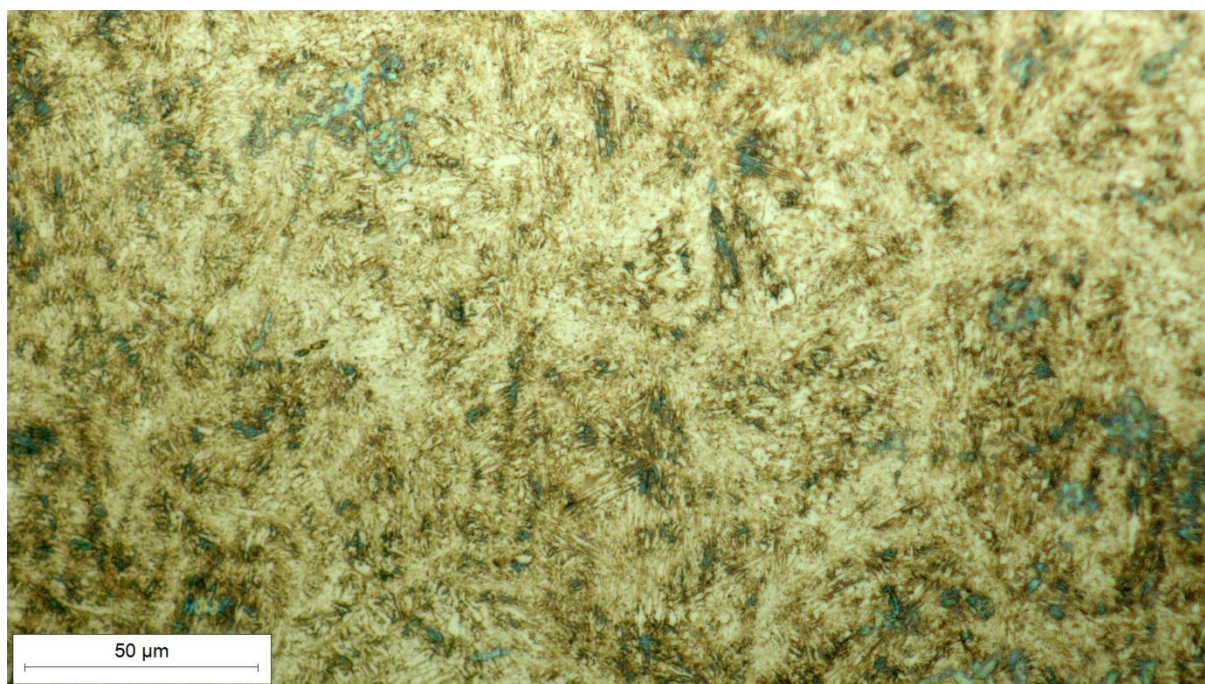
Slika 29. prikazuje mikrostrukturu u sredini poprečnog presjeka stijenke matrice pri povećanju 50×. Na slici 30. vidi se isto područje pri povećanju 200×, a na slici 31 pri povećanju 500×.



**Slika 29.** Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 50×

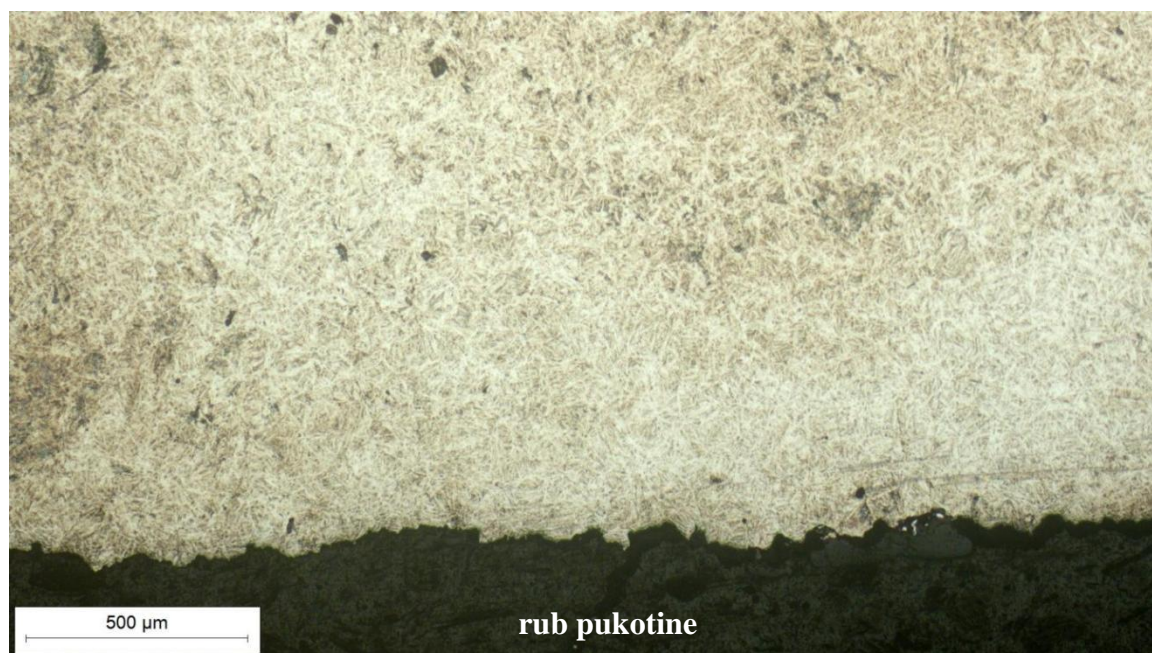


**Slika 30.** Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 200×

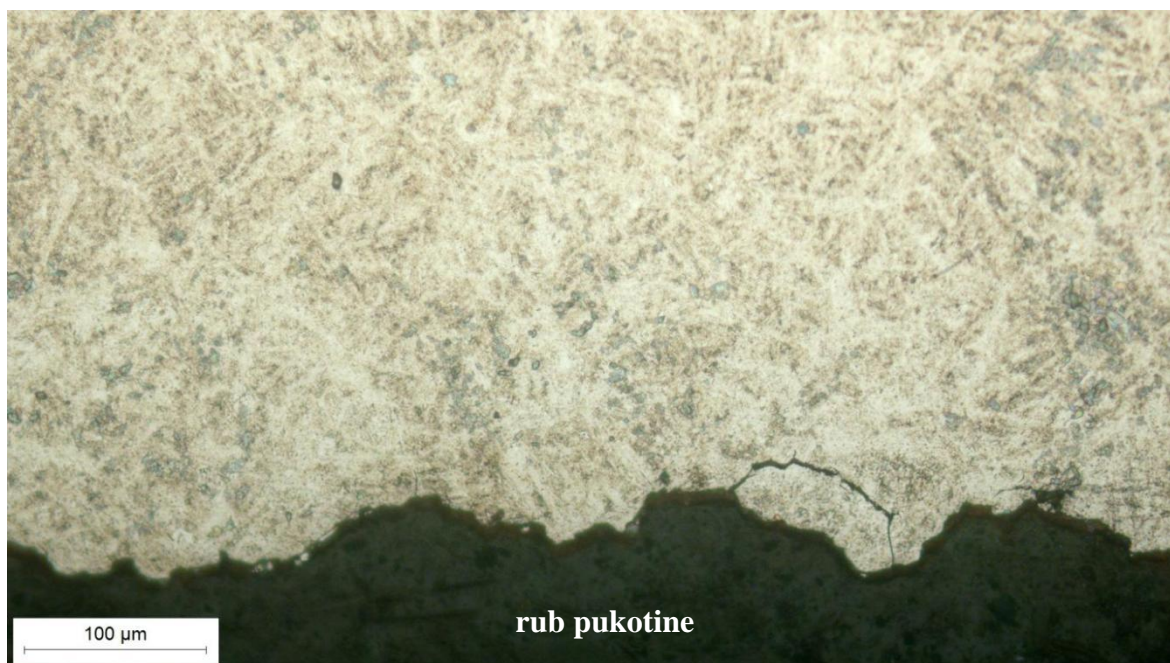


**Slika 31.** Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice u sredini, snimljeno pri povećanju 500×

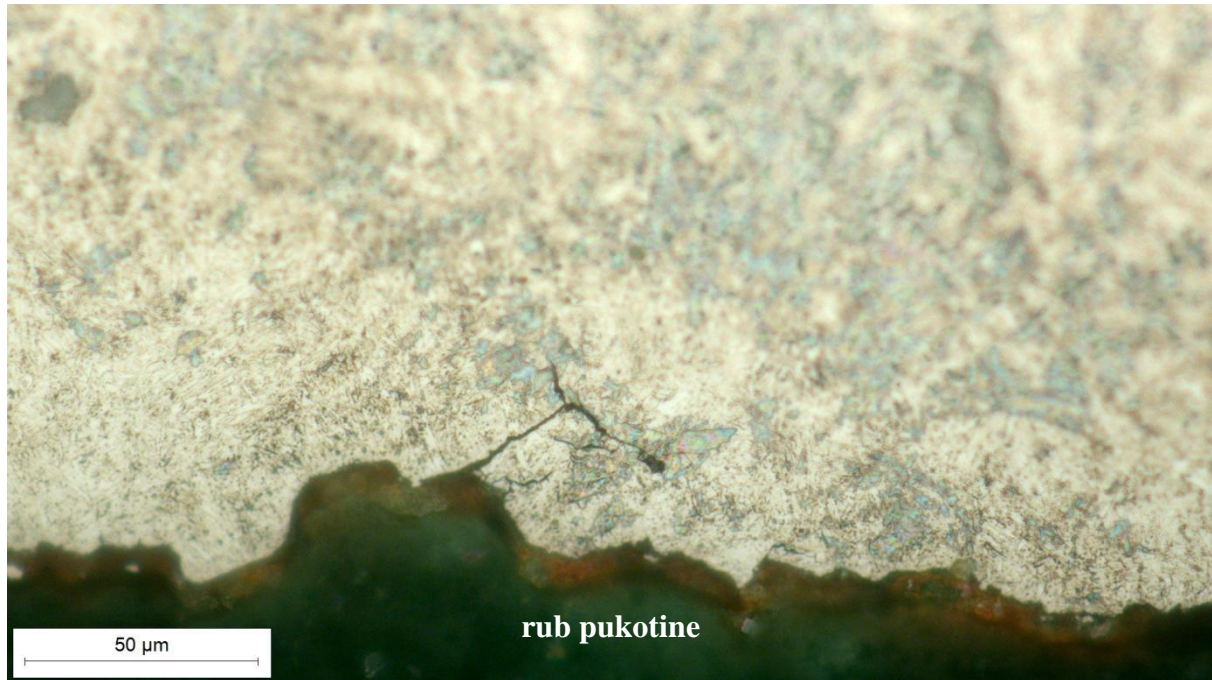
Na slici 32. prikazana je mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljene pri povećanju 50×. Na slici 33. i slici 34. vidi se isto područje snimljeno pri većem povećanju. Izgled mikrostrukture je vrlo sličan izgledu mikrostrukture u poprečnom presjeku.



**Slika 32.** Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 50×

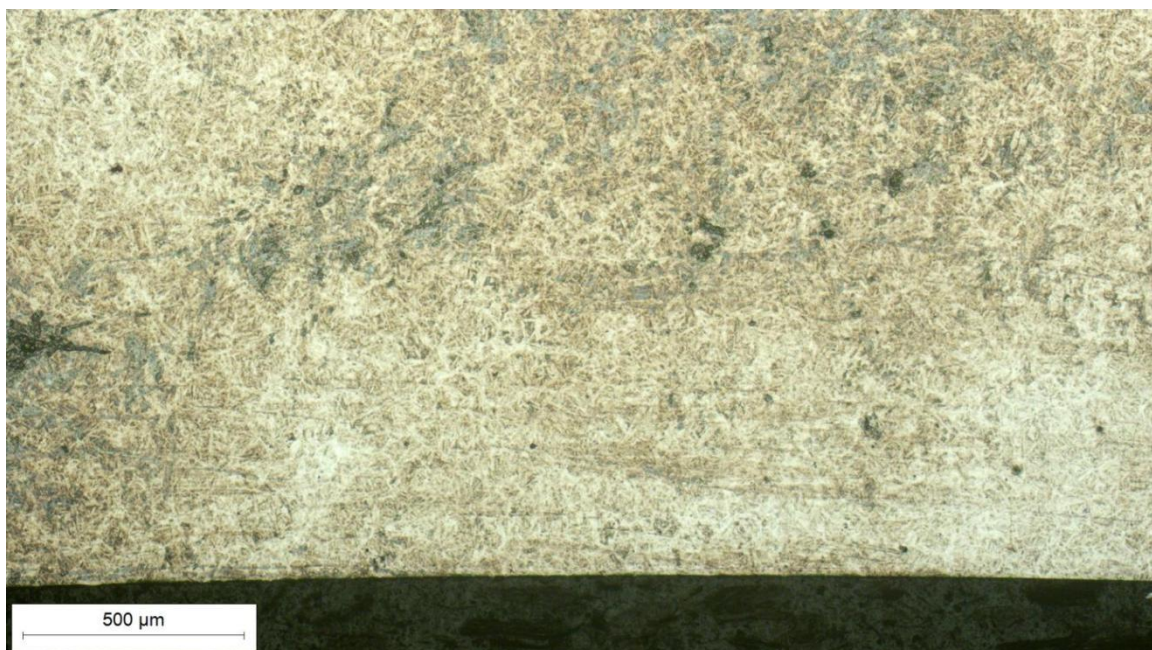


**Slika 33.** Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 200×

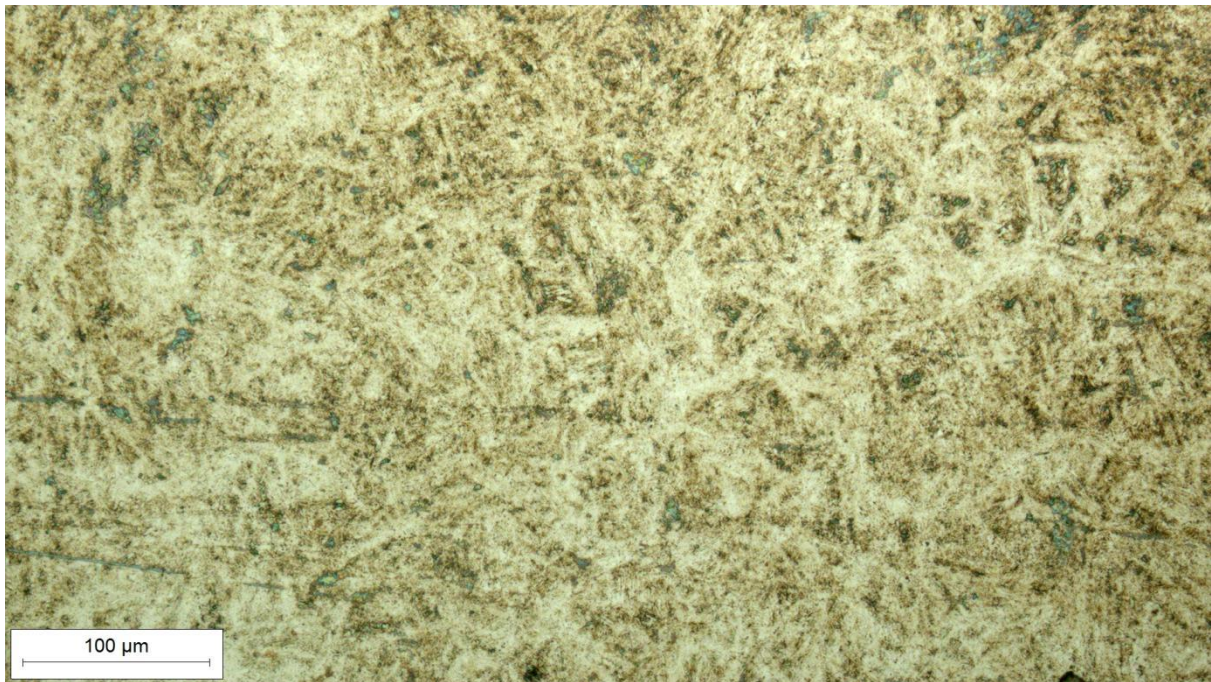


**Slika 34. Mikrostruktura uzdužnog presjeka stijenke matrice uz rub pukotine, snimljeno pri povećanju 500×**

Na slici 35. i slici 36. prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz unutarnji rub, dalje od pukotine. Ne može se uočiti značajna razlika između ovog područja i područja uz pukotinu.



**Slika 35. Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz unutarnji rub, dalje od pukotine, snimljeno pri povećanju 50×**



**Slika 36. Mikrostruktura poprečnog presjeka stijenke matrice uz unutarnji rub, dalje od pukotine, snimljeno pri povećanju 200×**



### 3.5 Mjerenje mikrotvrdoće uzorka

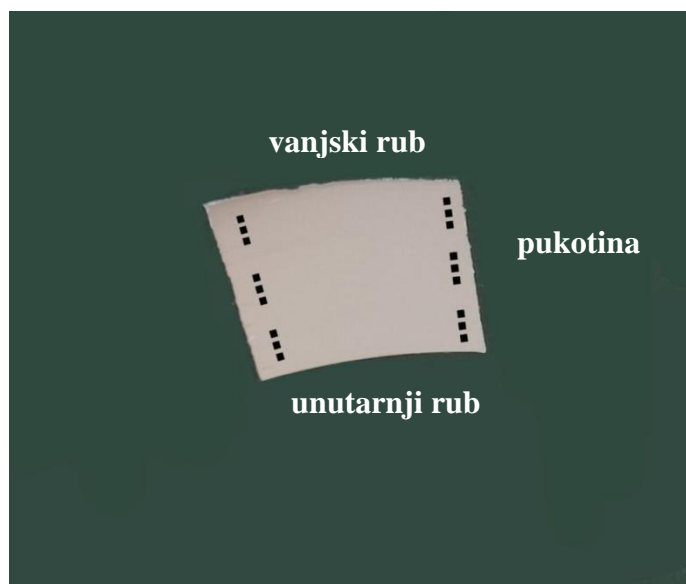
Na uzorku je provedeno mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju za mjerenje mikrotvrdoće PMT-3. Navedeni uređaj prikazan je na slici 37.



Slika 37. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće

Uzorci su podvrgnuti mjerenju mikrotvrdoće metodom po Vickersu čiji je penetrator istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od  $136^\circ$ . Utiskivanjem takvog penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide [20].

Pri mjerenju mikrotvrdoće koristio se uteg od 200 g što je omogućavalo silu pritiska na površinu od 1,96 N. Mikrotvrdoća je izmjerena na poprečnom presjeku uz vanjski i unutarnji rub te u sredini stijenke matrice kalupa, uz pukotinu i na dijelu stijenke gdje nema pukotina. Na svakoj poziciji napravljena su po tri mjerenja. Prikaz pozicija na kojima je izmjerena mikrotvrdoća vidi se na slici 38., a rezultati mjerenja prikazani su u tablici 8.



Slika 38. Pozicije izmjerene tvrdoće

Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2			
		uz pukotinu	dalje od pukotine
vanjski rub	1. mjerenje	540	483
	2. mjerenje	505	369
	3. mjerenje	349	355
	<b>srednja vrijednost</b>	<b>465</b>	<b>402</b>
sredina	1. mjerenje	639	655
	2. mjerenje	726	473
	3. mjerenje	655	707
	<b>srednja vrijednost</b>	<b>673</b>	<b>612</b>
unutarnji rub	1. mjerenje	883	623
	2. mjerenje	746	623
	3. mjerenje	639	623
	<b>srednja vrijednost</b>	<b>756</b>	<b>623</b>

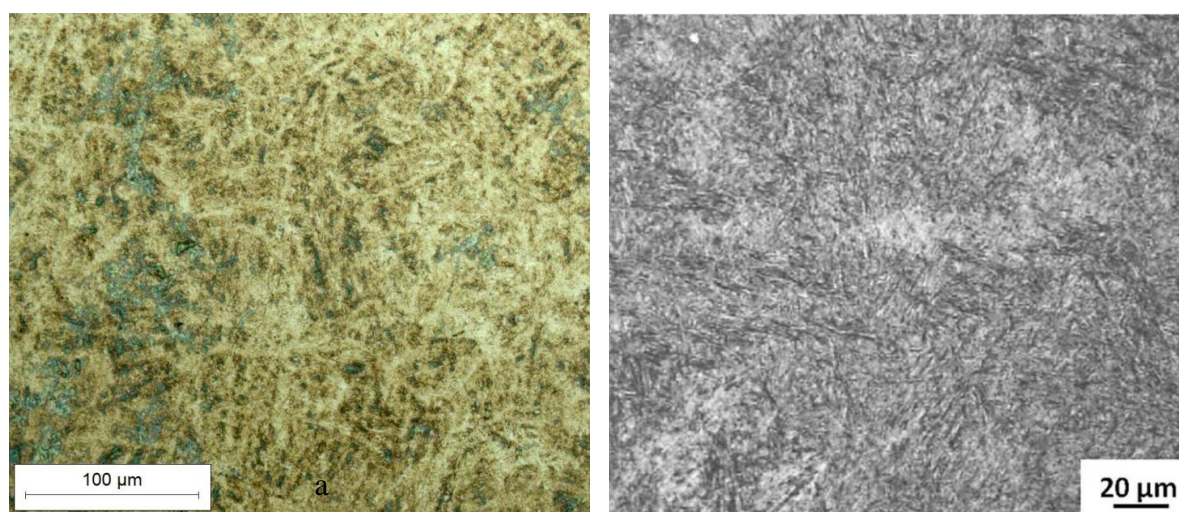
## 4 OSVRT NA REZULTATE

### 4.1 Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

Nakon provedene analize mikrostrukture stijenke matrice alata za injekcijsko prešanje polimera, u poliranom i nagriženom stanju, može se zaključiti da se mikrostruktura sastoji od martenzita i karbida. Ovakva mikrostruktura odgovara čeliku oznake X37CrMoV5-1 u kaljenom i popuštenom stanju. Maseni udio ugljika u čeliku je oko 0,37 %, a u sastavu čelika nalazi se i oko 5 % kroma i do 1,5 % molibdena. Čelik je austenitiziran na temperaturi od 1000 °C do 1040 °C zatim nadkritično hlađen u ulju, te popušten na 400 °C.

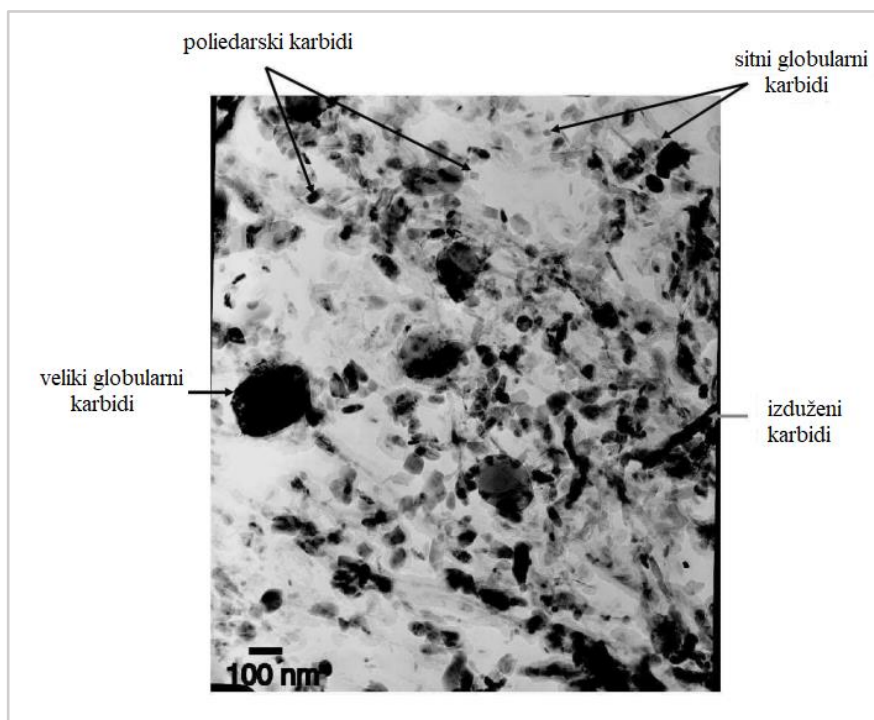
Prema TTT dijagramu ovog čelika u mikrostrukтури na temperaturi austenitizacije osim austenita prisutni su i neotopljeni karbidi koji su prisutni u strukturi i nakon kaljenja te nakon popuštanja [17]. Čestice karbida su vrlo sitne i ne vide se na svjetlosnom mikroskopu niti na povećanju od 1000×. Prema Mebarkiju to su karbidi tipa  $M_{23}C_6$  i karbidi tipa MC. Ova dva tipa karbida tvore najkrupnije čestice od svih tipova karbida ( $>100$  nm). U fazi popuštanja do 400 °C u analiziranom čeliku mogu se izlučiti karbidi MC i  $M_7C_3$  koji su znatno sitniji, prosječna veličina im je približno 6 nm. Prema udjelu ugljika i udjelu legirnih elemenata maksimalni volumni udio karbida može iznositi 8,1 % [19].

Na slici 39. prikazana je mikrostruktura analiziranog čelika snimljena na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju od 200× i uspoređena s mikrostrukturom istog čelika u sličnom stanju iz literature [18].



Slika 39. Usporedba mikrostrukture matrice kalupa (a) s mikrostrukturom iz literature [19]

Na slici 40. prikazani su mogući oblici karbida u čeliku X37CrMoV5-1 [19].



**Slika 40.** Mogući oblici karbida u čeliku X37CrMoV5-1 [19]

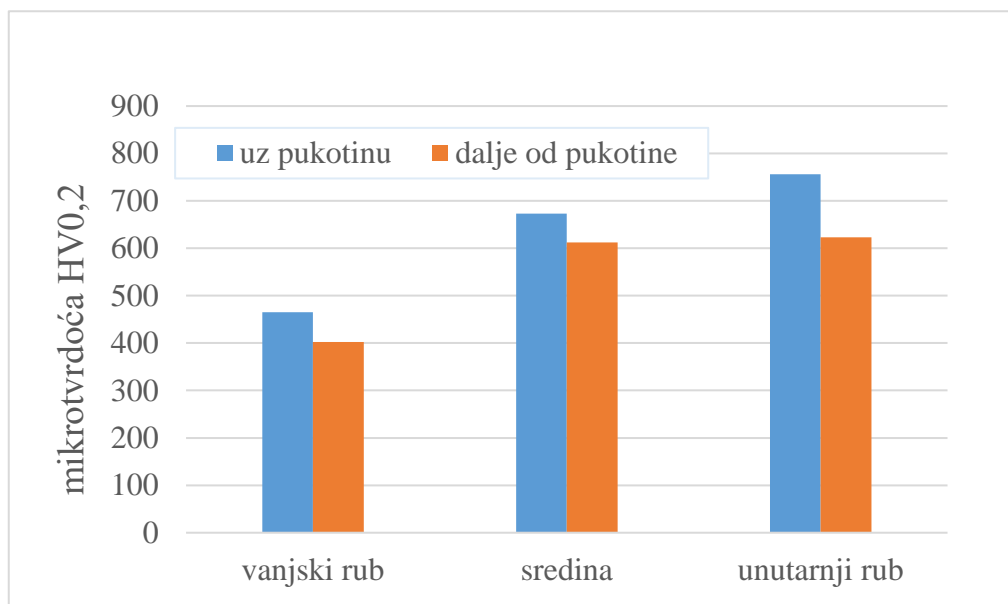
Između mikrostrukture uz pukotinu i dalje od pukotine nije se mogla uočiti nikakva razlika.

Pri analizi mikrostrukture u poliranom stanju vidjele su se sitne pukotine koje se šire od glavne pukotine u dubinu materijala. Na vanjskom rubu matrice i na površini pukotine nalaze se korozijski produkti.

#### 4.2 Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće

U dijagramu na slici 41. prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih mikrotvrdoća HV<sub>0,2</sub> na području uz pukotinu i dalje od pukotine. Jasno se vidi da su srednje vrijednosti mikrotvrdoće najviše uz unutarnji rub stijenke matrice, nešto niže su u sredini presjeka stijenke, a najniže uz vanjski rub stijenke matrice. Na svim navedenim pozicijama srednje vrijednosti tvrdoće uz pukotinu više su nego vrijednosti dalje od pukotine. Najveća razlika izmjerena je uz unutarnji rub matrice gdje je uz pukotinu izmjerena tvrdoća 756 HV<sub>0,2</sub>, a dalje od pukotine 625 HV<sub>0,2</sub>. Najniže srednje vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su uz vanjski rub matrice. Vrijednost mikrotvrdoće uz pukotinu je 465 HV<sub>0,2</sub>, a dalje od pukotine 402 HV<sub>0,2</sub>. Srednja vrijednost mikrotvrdoće uz pukotinu iznosi 673 HV<sub>0,2</sub>, a dalje od pukotine 612 HV<sub>0,2</sub>. Sve dobivene

vrijednosti mikrotvrdoće podudaraju se s vrijednostima iz TTT dijagrama na slici 9., osim srednje vrijednosti koja je izmjerena uz pukotinu na unutarnjem rubu stijenke matrice.



**Slika 41. Srednja vrijednost izmjerenih mikrotvrdoća**

Velike razlike u vrijednostima mikrotvrdoće na pojedinim pozicijama sigurno su posljedica razlika u mikrostrukturi. Na svjetlosnom mikroskopu pri povećanjima do 1000× nisu se mogle uočiti razlike u mikrostrukturi. Pri navedenim povećanjima ne mogu se vidjeti karbidi kojih sigurno ima više u područjima u kojima je izmjerena viša mikrotvrdoća.

Uzrok pucanja matrice kalup za injekcijsko prešanje polimera mogle bi biti mikrostrukturne promjene koje su nastale tijekom toplinske obrade zbog konstrukcijskog rješenja same matrice. Pukotina je nastala na dijelu matrice koji naglo prelazi s tanjem na deblji presjek i vrlo je moguće da su se tu tijekom toplinske obrade nakupile napetosti i da je postignuta mikrostruktura drugačija od ostatka matrice.

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće čelika oznake X37CrMoV 5-1 od kojeg je izrađena matrica kalupa za injekcijsko prešanje polimera, na kojoj se pojavila pukotina. Nakon strojne obrade matrica je toplinski obrađena kaljenjem i popuštanjem na 400 °C.

Na temelju dobivenih rezultata moguće je zaključiti sljedeće:

- mikrostruktura navedenog čelika sastojala se od martenzita i male količine karbida koji se nisu mogli razlučiti na svjetlosnom mikroskopu
- između mikrostrukture uz pukotinu i dalje od pukotine nije se mogla uočiti nikakva razlika
- uz glavnu pukotinu vide se sitne pukotine koje se šire u dubinu materijala
- srednje vrijednosti mikrotvrdoće najviše su uz unutarnji rub stijenke matrice, a najniže uz vanjski rub stijenke matrice
- srednje vrijednosti mikrotvrdoće uz pukotinu više su nego vrijednosti dalje od pukotine na svim mjerenim pozicijama
- uzrok pucanja stijenke matrice su vjerojatno mikrostrukturne promjene i zaostala naprezanja nastala tijekom toplinske obrade zbog konstrukcijskog rješenja same matrice.

## LITERATURA

- [1] Goodship V. Practical Guide to Injection Moulding. 2nd edition. United Kingdom, 2017
- [2] Godec, D. Doprinos sustavnom razvoju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera, [Magistarski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000.
- [3] Čatić I. Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera. Zagreb: Društvo plastičara i gumaraca, 1985.
- [4] Injection Molding Process, Defects, Plastic, dostupno na: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>, pristupljeno: 18.2.2023.
- [5] Siminiati D, Pomenić L, Oršić F. Određivanje osnovnih parametara za injekcijsko prešanje plastike. Rijeka, 2008.
- [6] Robotics in Injection Moulding – RNA Automation, dostupno na: <https://www.rnaautomation.com/insight/robotics-in-injection-moulding/>, pristupljeno 21.2.2023
- [7] Čatić I. Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina. Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.
- [8] Godec D. predavanja iz kolegija “Alati i naprave”. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje 2022/2023.
- [9] Temperirala na ulje TOP 200°C - 300°C – Nomis, dostupno na: <https://nomis.hr/proizvod/temperirala-na-ulje-top-200c-300c/#>, pristupljeno: 21.2.2023.
- [10] Landek D. predavanja iz kolegija “Posebni metalni materijali”. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje 2020/2021.
- [11] Novosel M, Cajner F, Krumes D. Alatni materijali. Slavonski Brod, 1996.
- [12] Filetin T, Kovačić F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: 2002.
- [13] Stupnišek M, Cajner F. Osnove toplinske obrade. Zagreb: 2019.
- [14] HRN EN 10027-2:2015, dostupno na: <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+10027-2%3A2015>, pristupljeno: 21.2.2023.
- [15] HRN EN ISO 4957\_2008 \_ Hrvatski normativni dokument \_ HRN4You - Hrvatski zavod za norme, dostupno na: <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+4957%3A2008>, pristupljeno: 22.2.2023.
- [16] X37CrMoV5-1 \_ 1.2343 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties, dostupno na: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=989](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=989), pristupljeno: 21.2.2023.

- 
- [17] SITHERM 2343 Steel (Mat.No. 1.2343, DIN X38CrMoV5-1, AISI H11), dostupno na: <https://steelselector.sij.si/steels/UTOPMO1.html> , pristupljeno 21.2.2023.
- [18] Metals \_ Free Full-Text \_ Selected Properties of Hardfacing Layers Created by PTA Technology, dostupno na: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/1/134/htm> , pristupljeno 21.2.2023
- [19] Mebarki N, Delagnes P, Leviallant C. Relationship between microstructure and mechanical properties of 5 % CR hot work tool steel. France
- [20] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Čurković L. Materijali 1. Zagreb: 2019