

# Utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg austenitnog čeličnog lijeva

---

**Bratić, Lucia**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:503106>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lucia Bratić**

Zagreb, 2020

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:  
Lucia Bratić

Zagreb, 2020

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

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Ivoni i Vitomiru, i sestri Antei na neizmjerne podršci tijekom čitavog studija te ostatku obitelji, dečku i prijateljima.

Posebno se zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog rada.

Lucia Bratić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske  
ispite Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za  
smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Lucia Bratić**

Mat. br.: 0035213330

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg austenitnog čeličnog lijeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of microstructural changes on tribological properties of austenitic cast stainless steel**

Opis zadatka:

Nehrđajući austenitni ljevovi su posebna skupina nehrđajućih čeličnih ljevova koja se izdvaja od ostalih po velikom broju vrsta i po proizvedenoj količini. Ističu se po izvanrednoj korozivnoj otpornosti i jako dobrim mehaničkim i tehnološkim svojstvima. Njihov sastav i režim hlađenja podešeni su tako da im mikrostruktura na sobnoj temperaturi bude potpuno austenitna ili austenitno-feritna pri čemu udio ferita može biti od 5 do 40 %. Ugljik treba biti potpuno otopljen u kristalu mješancu. Ako se iz bilo kojeg razloga austenitni ljev kroz dulje vrijeme zadrži na temperaturi između 425°C i 870°C, na granicama kristalnih zrna može doći do precipitacije karbida što će ljev učiniti osjetljivim na interkristalnu koroziju.

U radu je potrebno ispitati kako formiranje karbida po granicama zrna utječe na tvrdoću i tribološka svojstva nehrđajućeg austenitnog čeličnog lijeva. Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
15. svibnja 2020.

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

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadala:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI .....	2
2.1 Korozijska postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova .....	2
2.2 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova .....	3
2.3 Sustav označivanja nehrđajućih čeličnih ljevova .....	5
2.4 Podjela nehrđajućih čeličnih ljevova .....	6
3. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI .....	8
3.1 Podjela austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova .....	8
3.2 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova .....	9
3.3 Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova .....	10
3.4 Korozijska postojanost austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova .....	11
4. TROŠENJE MATERIJALA .....	14
4.1 Abrazijsko trošenje materijala .....	14
4.1.1 Kritična veličina abrazivnih čestica .....	20
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	21
5.1 Cilj rada .....	21
5.2 Materijali za ispitivanje .....	21
5.3 Provođenje ispitivanja .....	23
5.3.1 Toplinska obrada austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva u vakuumskoj peći .....	23
5.3.2 Ispitivanje abrazijske otpornosti .....	24

5.3.3 Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 .....	26
5.3.4 Analiza mikrostrukture .....	27
5.4 Rezultati provedenih ispitivanja .....	28
5.5 Analiza rezultata .....	33
ZAKLJUČAK .....	37
LITERATURA.....	38
PRILOZI .....	39

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Različiti dijelovi za plinovode, rafinerije i napojne pumpe izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva [1] .....	1
Slika 2.	Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeličnom lijevu [2] .....	3
Slika 3.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva - 100% austenit [5] .....	9
Slika 4.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva s delta-feritom [6] .....	10
Slika 5.	Utjecaj sadržaja ugljika na početak izlučivanja karbida kod Fe-C legure s 18% kroma i 8% nikla [4] .....	12
Slika 6.	Shematski prikaz toplinske obrade nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) nehrđajućeg čeličnog lijeva [4] .....	13
Slika 7.	Teorijski model abrazije [8] .....	14
Slika 8.	Jedinični događaj abrazije [7] .....	15
Slika 9.	Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [7] .....	16
Slika 10.	Mikrobrazdanje [7] .....	16
Slika 11.	Mikrorezanje [7] .....	17
Slika 12.	Mikronaprnuća [7] .....	17
Slika 13.	Mikroumor [7] .....	17
Slika 14.	Čista abrazija [7] .....	18
Slika 15.	Selektivna abrazija [7] .....	19
Slika 16.	Nulta abrazija [7] .....	19
Slika 17.	Utjecaj veličine zrna na intenzitet abrazijskog trošenja [7] .....	20
Slika 18.	Odljevak lijeva oznake GX5CrNi 19-10 .....	22
Slika 19.	Izrezani uzorci iz odljevka lijeva oznake GX5CrNi 19-10 .....	22
Slika 20.	Vakuumska peć .....	23
Slika 21.	Taber abrader .....	24
Slika 22.	Vaga .....	25
Slika 23.	Uređaj za mjerenje tvrdoće .....	26
Slika 24.	Optički mikroskop .....	27
Slika 25.	Pripremljen uzorak za ispitivanje mikrostrukture .....	31
Slika 26.	Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10, snimljena prije toplinske obrade pri povećanju 200× .....	31



---

Slika 27.	Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10 , snimljena poslije toplinske obrade pri povećanju 200× .....	32
Slika 28.	Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10, snimljena poslije toplinske obrade pri povećanju 500× .....	32
Slika 29.	Rezultati trošenja na papiru P220 .....	33
Slika 30.	Rezultati trošenja na papiru P500 .....	34
Slika 31.	Rezultati trošenja toplinski neobrađenih uzoraka na oba brusna papira .....	35
Slika 32.	Rezultati trošenja toplinski obrađenih uzoraka na oba brusna papira .....	35
Slika 33.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 uzoraka .....	36

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Alfageni legirni elementi i njihov utjecaj na svojstva .....	4
Tablica 2.	Gamageni legirni elementi i njihov utjecaj na svojstva .....	5
Tablica 3.	Osnovne skupine nehrđajućih čeličnih ljevova prema mikrostrukturi .....	7
Tablica 4.	Maseni udjeli važnijih legirnih elemenata i ugljika u austenitnim nehrđajućim ljevovima [2].....	8
Tablica 5.	Kemijski sastav lijeva oznake GX5CrNi 19-10 [9].....	21
Tablica 6.	Brusni papiri .....	24
Tablica 7.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade na brusnom papiru P220.....	28
Tablica 8.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade na brusnom papiru P500.....	28
Tablica 9.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje poslije toplinske obrade na brusnom papiru P220.....	29
Tablica 10.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje poslije toplinske obrade na brusnom papiru P500.....	29
Tablica 11.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 prije toplinske obrade .....	30
Tablica 12.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 nakon toplinske obrade .....	30

## SAŽETAK

Osnovni cilj rada bio je istražiti utjecaj mikrostrukturnih promjena na abrazijsku otpornost nehrđajućeg austenitnog čeličnog lijeva oznake GX5CrNi 19-10. U teorijskom dijelu rada navedeni su uvjeti korozijske postojanosti, mikrostruktura, svojstva i podjela nehrđajućih čeličnih ljevova. Detaljnije su opisani austenitni nehrđajući čelični ljevovi. Također je opisan abrazijski mehanizam trošenja i utjecaj veličine abrazijskog zrna na gubitak mase pri abraziji. U eksperimentalnom dijelu rada prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje i rezultati mjerenja mikrotvrdoće. Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je na uređaju Taber abrader na brusnim papirima kvalitete P220 i P500. Ispitivanje je provedeno na uzorcima sa 100%-tnom austenitnom mikrostrukturom i na uzorcima koji su žareni na 750 °C/1 h, kod kojih je došlo do porasta austenitnih zrna i do izlučivanja kromovih karbida po granicama zrna. Utvrđeno je da navedene mikrostrukturne promjene smanjuju tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje austenitnog nehrđajućeg lijeva. Također je utvrđeno da se otpornost na abrazijsko trošenje smanjuje s povećanjem veličine abrazivnih čestica.

Ključne riječi: otpornost na abraziju, austenitni nehrđajući čelični ljev, senzibilizacija

## SUMMARY

The objective of this bachelor thesis was to investigate the influence of microstructural changes on the abrasion resistance of austenitic cast stainless steel grade GX5CrNi 19-10. The general conditions in which cast stainless steel are corrosion resistant, as their microstructure, properties and classification were described in theoretical part of the paper. The theoretical focus was given on describing the austenitic cast stainless steel. During the abrasion process, wear mechanisms and the influence of the abrasive particle size on the weight loss are also monitored. In the results section, data obtained from abrasion resistance testing and the microhardness measurements are presented and explained. Abrasion resistance testings were carried out on a Taber abrader device on the P220 and P500 abrasive papers. The test was conducted on samples with 100% austenitic microstructure and on samples heated at 750 °C/1h, which demonstrated an austenitic grain growth and precipitation of chromium carbides at the grain boundaries. It was determined that these microstructural changes reduce the hardness and abrasion resistance of austenitic cast stainless steel. Also, the abrasion resistance decreases with increasing abrasive particle size.

Key words: abrasion resistance, austenitic cast stainless steel, sensitization

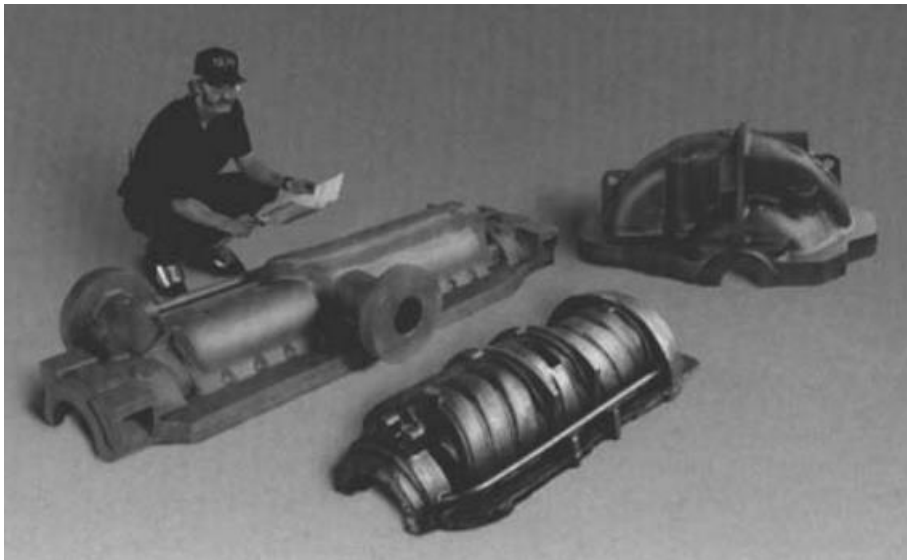
## 1. UVOD

Nehrđajući čelični ljevovi su posebna skupina materijala koje odlikuje izvrsna korozivna postojanost. Svojstva im se ne mogu poboljšati obradom gnječenjem, što je glavna razlika u odnosu na nehrđajući čelik čija se primarna struktura nakon lijevanja plastično deformira različitim postupcima (valjanjem, kovanjem, savijanjem...). Nehrđajući čelični ljev je pri izlasku iz talionice gotov proizvod čiji se oblik može, ako je potrebno, doraditi obradom odvajanjem čestica, a svojstva eventualnom naknadnom toplinskom obradom. Nehrđajući čelik se tek naknadno, po izlasku iz talionice, formira u konačan proizvod.

Jedno od najvažnijih svojstava nehrđajućih čeličnih ljevova je otpornost na abrazivno trošenje. Otpornost na abraziju je određena s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Odnosno, otpornost na abrazivno trošenje je direktno povezana s tvrdoćom materijala. Što je tvrdoća materijala veća, to bi i otpornost na abrazivno trošenje trebala biti veća.

Glavna područja primjene nehrđajućih čeličnih ljevova su u industriji nafte i plina te u prehrambenoj i kemijskoj industriji. U svim ovim područjima primjene, uz otpornost na trošenje, korozivna postojanost je jedan od osnovnih zahtjeva.

Na slici 1 mogu se vidjeti različiti dijelovi izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva.



**Slika 1.            Različiti dijelovi za plinovode, rafinerije i napojne pumpe izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva [1]**

## 2. NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI

Nehrđajući čelični ljevovi su posebna skupina metalnih materijala, visokolegirane Fe-C legure s masenim udjelom željeza između 50 i 88% [2].

### 2.1 Korozijska postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova

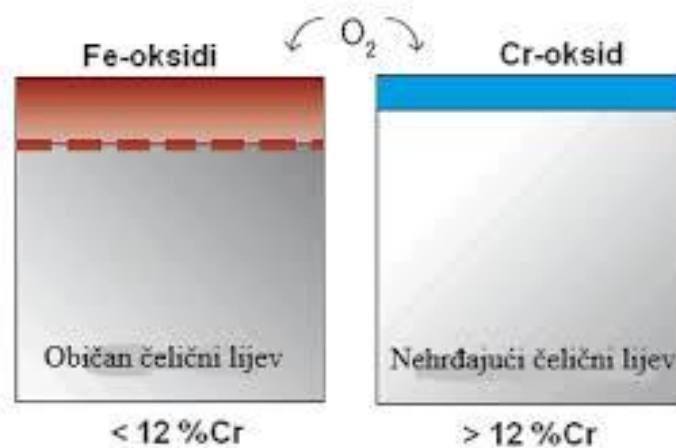
Korozija je proces spontanog razaranja materijala uslijed kemijskog ili elektrokemijskog djelovanja okoliša. Korozijska postojanost tehničkih materijala je sposobnost materijala da se suprotstave korozijskom djelovanju medija [3].

Ono što nehrđajuće ljevove čini posebnima u odnosu na druge materijale je upravo njihova izvrsna korozijska postojanost. Kako bi čelični ljev bio korozijski postojan moraju biti zadovoljena dva uvjeta:

- Maseni udio kroma u sastavu materijala mora biti viši od 12%, s tim da krom treba biti u potpunosti otopljen u kristalu mješancu.
- Materijal treba imati monofaznu strukturu, s tim da to ne mora nužno biti zadovoljeno; iako većina nehrđajućih ljevova ima upravo monofaznu strukturu postoje i oni čija se mikrostruktura sastoji od dvije ili više faza. Ako se mikrostruktura sastoji od više faza bitno je da razlika potencijala između tih faza bude što niža, kako ne bi došlo do stvaranja galvanskog članka [2].

U oksidirajućoj atmosferi, na površini nehrđajućih čeličnih ljevova formira se tanak, oku nevidljiv, film. Taj film je zapravo sloj kromovog oksida koji štiti površinu nehrđajućeg čeličnog lijeva od utjecaja agresivnog medija i okoliša. Kako bi film bio kompaktan i osiguravao pasivnost površine, maseni udio kroma u sastavu materijala mora biti viši od 12%. Što je taj postotak veći pasivnost se povećava, tako da u praksi većina nehrđajućih čeličnih ljevova sadrži između 17 i 18% kroma.

Na slici 2 prikazano je formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeličnom lijevu.



Slika 2. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeličnom ljevu [2]

## 2.2 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova

Nehrđajući čelični ljevovi legiraju se različitim elementima u svrhu postizanja optimalne korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Uz legirne elemente, u sastavu ljevova mogu se naći i različite nečistoće koje kao i legirni elementi mogu bitno utjecati na svojstva i karakteristike ljevova. U nečistoće se najčešće ubrajaju dušik, kisik, sumpor i fosfor i uglavnom nepoželjno djeluju na svojstva ljevova.

Najvažniji legirni element u nehrđajućim čeličnim ljevovima je krom, ali dodavanjem nekih drugih legirnih elemenata, primjerice molibdena, nikla ili dušika, bitno se doprinosi korozijskoj postojanosti. Drugi legirni elementi dodaju se kako bi doprinijeli korozijskoj postojanosti u određenim uvjetima primjene i osigurali mikrostrukturnu ravnotežu. Postoje dvije skupine legirnih elemenata, alfa i gama legirni elementi. Alfa legirni elementi ili feritotvorci promiču ili stabiliziraju ferit. Gama legirni elementi ili austenotvorci promiču ili stabiliziraju austenit [2][4].

U tablici 1 navedeni su neki od važnijih alfa legirnih elemenata s pripadnim utjecajem na svojstva.

Tablica 1. Alfageni legirni elementi i njihov utjecaj na svojstva

ALFAGENI LEGIRNI ELEMENTI	UTJECAJ NA SVOJSTVA
KROM	Osigurava korozijsku postojanost, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, poboljšava otpornost na puzanje, jaki karbidotvorac
MOLIBDEN	Poboljšava otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu, kod austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova povišuje čvrstoću pri povišenoj temperaturi, jaki karbidotvorac
SILICIJ	Poboljšava livljivost i otpornost na oksidaciju pri niskim i visokim temperaturama
NIOBIJ	Poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju i mehanička svojstva pri povišenim temperaturama, dodaje se austenitnim nehrđajućim čeličnim ljevovima za stabilizaciju mikrostrukture i sprječavanje senzibilizacije
ALUMINIJ	Poboljšava otpornost na oksidaciju i pougljičavanje pri visokim temperaturama
VANADIJ	Jaki karbidotvorac, s ugljikom tvori stabilne karbide koji povoljno djeluju na čvrstoću pri povišenoj i visokoj temperaturi
VOLFRAM	Jaki karbidotvorac, u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima povišuje otpornost na rupičastu koroziju



U tablici 2 navedeni su najčešći gamageni legirni elementi s pripadnim utjecajem na svojstva.

**Tablica 2. Gamageni legirni elementi i njihov utjecaj na svojstva**

GAMAGENI LEGIRNI ELEMENTI	UTJECAJ NA SVOJSTVA
NIKAL	Poboljšava žilavost, duktilnost, zavarljivost, otpornost na oksidaciju i pougljičavanje, otpornost na umor pri povišenim temperaturama i korozijsku postojanost u jakim kiselinama
MANGAN	Sprječava stvaranje željeznog sulfida koji uglavnom loše utječe na svojstva, dodaje se specijalnim legurama da poboljša topivost dušika u austenitnoj fazi, ne utječe bitno na mehanička svojstva
DUŠIK	Neizbježan u malim količinama kao nečistoća, namjerno se dodaje austenitnim i dupleks nehrđajućim ljevovima za povišenje čvrstoće i otpornosti na rupičastu koroziju
BAKAR	U dupleks nehrđajućim ljevovima poboljšava otpornost na rupičastu koroziju, osigurava korozijsku postojanost u sumpornoj kiselini
KOBALT	Koristi se samo kod martenzitnih nehrđajućih ljevova da povisi temperaturu početka transformacije austenita u martenzit

### 2.3 Sustav označivanja nehrđajućih čeličnih ljevova

Prema hrvatskoj i europskoj normi oznake ljevova počinju velikim slovom G. S obzirom na to da se radi o visokolegiranim čeličnim ljevovima, oznaka se nastavlja s velikim slovom X iza kojeg slijedi sadržaj ugljika pomnožen sa 100 te kemijski simboli i maseni udjeli legirnih elemenata poredani po veličini masenih udjela [1].

Na primjer:

- GX6CrNi 13-4 - oznaka za visokolegirani ljev s 0,06 % C, oko 13 % Cr i oko 4 % Ni

## 2.4 Podjela nehrđajućih čeličnih ljevova

Nehrđajući čelični ljevovi se uglavnom klasificiraju ili kao toplinski postojani, ili kao korozijski postojani, ovisno o udjelu ugljika u sastavu čelika [1].

Prva skupina, toplinski postojani nehrđajući čelični ljevovi, su ljevovi koji se primjenjuju na temperaturama iznad 650 °C. U odnosu na drugu skupinu, sadrže više ugljika, iskazuju bolju otpornost na pužanje pri visokim temperaturama, ali su slabije korozijski postojani.

Druga skupina, korozijski postojani nehrđajući čelični ljevovi, su ljevovi koji se primjenjuju na temperaturama do 650 °C, sadrže manje ugljika (uglavnom između 0,02 i 0,03%) i u usporedbi s toplinski postojanim ljevovima su otporniji na koroziju.

Druga sistematizacija nehrđajućih čeličnih ljevova napravljena je s obzirom na njihov kemijski sastav. Prema kemijskom sastavu mogu se podijeliti u četiri različite grupe [1]:

- Cr – čelični ljevovi
- Cr-Ni – čelični ljevovi
- Cr-Ni-Mo – čelični ljevovi
- Cr-Mn – čelični ljevovi.

Međutim, najčešće se nehrđajući čelični ljevovi svrstavaju prema mikrostrukturi u tri skupine [1]:

- austenitni nehrđajući čelični ljevovi
- martenzitni nehrđajući čelični ljevovi
- dupleks nehrđajući čelični ljevovi.

U tablici 3 prikazane su osnovne skupine nehrđajućih čeličnih ljevova s pripadnim mikrostrukturama.

Austenitni nehrđajući čelični ljevovi mogu imati potpuno austenitnu mikrostrukturu, ali mogu uz austenit sadržavati još i određenu manju količinu ferita ili određenu količinu karbida.

Martenzitni nehrđajući čelični ljevovi mogu biti potpuno martenzitni ili uz martenzit mogu sadržavati još i određenu količinu karbida.

Dupleks nehrđajući čelični ljevovi imaju izbalansiranu feritno-austenitnu mikrostrukturu s podjednakom količinom ferita i austenita.

**Tablica 3. Osnovne skupine nehrđajućih čeličnih ljevova prema mikrostrukturi**

NAZIV SKUPINE	MIKROSTRUKTURA
Martenzitni nehrđajući ljevovi	M ili (M + K)
Austenitni nehrđajući ljevovi	A ili (A + F) ili (A + K)
Dupleks nehrđajući ljevovi	F+A

### 3. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI

Austenitni nehrđajući čelični ljevovi su najraširenija skupina nehrđajućih ljevova i prva po upotrebi i proizvodnji, jer zadržavaju odlična svojstva i pri vrlo niskim i pri višim temperaturama.

Sadrže između 16 i 25% kroma te više od 8% gamagenih legirnih elemenata. Uglavnom sadrže dušik koji se dodaje u svrhu povišenja vrijednosti čvrstoće na niskim i na sobnoj temperaturi i nikal za stabilizaciju austenitne mikrostrukture [1].

U tablici 4 prikazani su maseni udjeli važnijih legirnih elemenata i ugljika u austenitnim nehrđajućim ljevovima.

**Tablica 4. Maseni udjeli važnijih legirnih elemenata i ugljika u austenitnim nehrđajućim ljevovima [2]**

ELEMENT	MASENI UDIO, %
KROM	16 do 26
NIKAL	8 do 35
MANGAN	1 do 2 (4 do 15,5)
SILICIJ	0,5 do 3
MOLIBDEN	do 2
DUŠIK	do 0,15
TITAN I NIOBIJ	do 0,2
UGLJIK	0,02 do 0,08 (0,1)

#### 3.1 Podjela austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova

Prema kemijskom sastavu austenitni nehrđajući ljevovi mogu se podijeliti u tri skupine [1]:

- *Austenitni nehrđajući čelični ljevovi s niklom i kromom*

Prema brojanom sustavu označivanja oznaka započinje s 1.43XX.

Kemijski sastav:  $\geq 2,5\%$  Ni, bez Mo, Nb i Ti.

Primjeri: GX5CrNi19-10, GX2CrNi19-11...

- *Austenitni nehrđajući čelični ljevovi s molibdenom*

Prema brojanom sustavu označivanja oznaka započinje s 1.44XX.

Kemijski sastav:  $\geq 2,5\%$  Ni, s Mo, bez Nb i Ti.

Primjeri: GX5CrNiMo19-11-2, GX2CrNiMo19-11-2...

- *Austenitni nehrđajući čelični ljevovi sa specijalnim dodacima*

Prema bročanom sustavu označivanja oznaka započinje s 1.45XX.

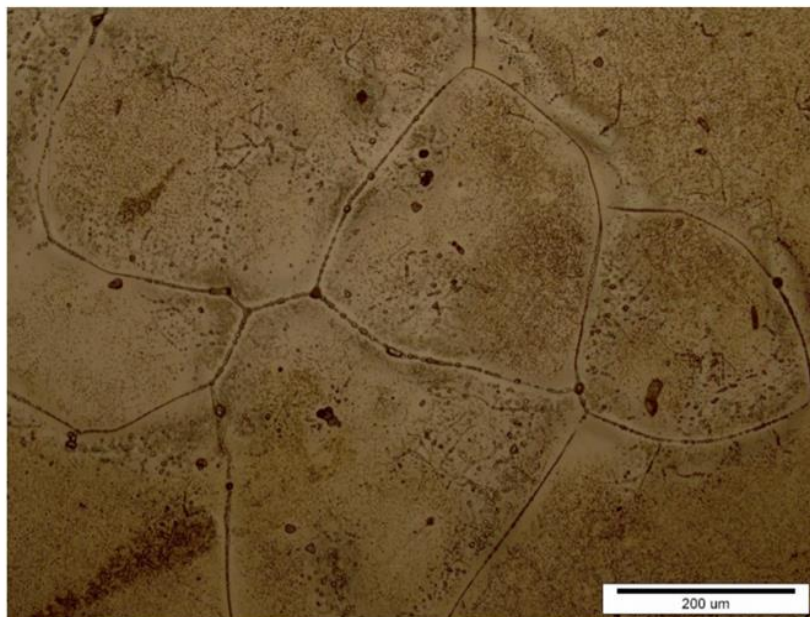
Primjeri: GX4NiCrCuMo30-20-4, GX2CrNiMoCuN20-18-6...

### 3.2 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova

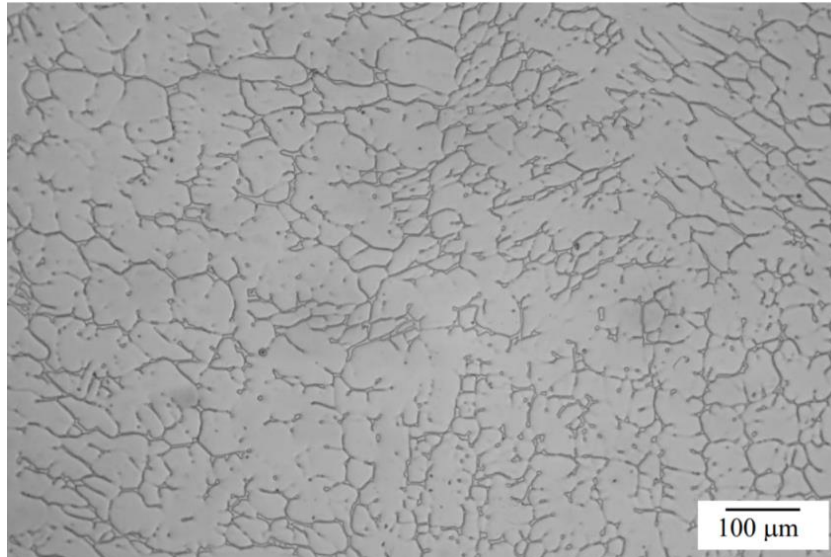
Na sobnoj temperaturi, mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova može biti 100% austenitna (slika 3) ili može sadržavati austenit i delta-ferit (slika 4). Volumni udio delta-ferita uglavnom ovisi o udjelima alfagenih i gamagenih legirnih elemenata. Delta-ferit smanjuje osjetljivost na napetosnu koroziju, poboljšava livljivost, zavarljivost i čvrstoću, a loše djeluje na žilavost [1].

Feritna faza nastaje zbog segregacije alfagenih legirnih elemenata (ponajprije kroma) tijekom kristalizacije i naknadne toplinske obrade [2].

U mikrostrukturi austenitnih nehrđajućih ljevova može se nalaziti određena količina karbida.



**Slika 3.** Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog ljeva - 100% austenit [5]



**Slika 4. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva s delta-feritom [6]**

### **3.3 Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova**

Iako su skuplji od ostalih ljevova zbog visokog udjela legirnih elemenata, austenitni nehrđajući čelični ljevovi su i dalje najbrojnija skupina (po vrstama i po proizvedenoj količini) zbog odlične kombinacije korozivskih i mehaničkih svojstava. Iako se obrađuju obradom odvajanjem čestica i vrlo su dobro zavarljivi. Zadržavaju dobra svojstva pri niskim temperaturama, a koriste se čak do temperature od 760 °C na kojoj i dalje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Ipak, postoje vrste austenitnih nehrđajućih ljevova koje se koriste čak i pri temperaturama od 1000 °C. Te vrste sadrže veći udio legirnih elemenata, posebno silicija, aluminijska i ugljika koji povećavaju vrijednosti čvrstoće pri visokim temperaturama te otpornost na oksidaciju i pougljičavanje. Nisu magnetični, visoko su žilavi i duktilni materijali. Iako su visoko oksidacijski i korozivski postojani, osjetljivi su na napetosnu koroziju tako da se izbjegava njihova primjena u kloridnim medijima i morskoj vodi [2][4].

Područja uporabe austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova su dosta različita. Tipična područja primjene su industrija nafte i plina, farmaceutska industrija, kemijska industrija te industrija hrane i pića.

Na kemijski sastav austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova postavlja se nekoliko zahtjeva kako bi se postigla austenitna mikrostruktura i zadovoljavajuća svojstva [4]:

- maseni udio ugljika treba biti što niži (<0,15%), kako bi se smanjila mogućnost nastanka karbida

- maseni udio kroma treba biti što viši (>18%), radi povećanja antikorozivnosti
- maseni udio nikla što viši (>8%), za stabilizaciju austenitne mikrostrukture
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak delta-ferita te poboljšavaju otpornost na interkristalnu koroziju
- povišeni udio dušika (0,2-0,4%) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetonsnu koroziju.

### 3.4 Korozijska postojanost austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova

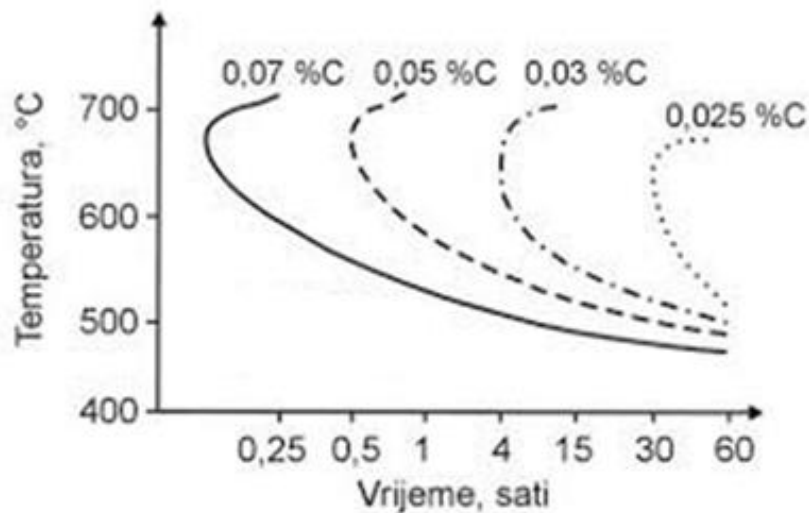
Kao i ostale skupine nehrđajućih čeličnih ljevova, austenitni ljevovi su izvrsno korozijski postojani. Ipak, kod nekih austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova postoji opasnost od pojave senzibilizacije, koja predstavlja problem u pogledu korozijske postojanosti.

Nastanak karbida u austenitnim ljevovima uglavnom se smatra nepoželjnom pojavom koja se nastoji izbjeći.

Ako se austenitni ljevovi obrađuju ili primjenjuju neko vrijeme u temperaturnom području između 425 i 870 °C, po granicama austenitnih zrna mogu se formirati sitni karbidni precipitati. Ova pojava poznata je pod nazivom senzibilizacija mikrostrukture [1].

Najveći problem stvara karbid tipa  $Cr_{23}C_6$  zato što loše utječe na korozijsku postojanost i postoji povećani rizik od interkristalne korozije. Veća opasnost od senzibilizacije postoji kod ljevova koji u svom sastavu imaju manji udio kroma [4].

Na slici 5 prikazan je TTT-dijagram u kojem se vidi dinamika nastanka karbida u ovisnosti o sadržaju ugljika u kod Fe-C legure s 18% kroma i 8% nikla. U dijagramu se može vidjeti za koje će vrijeme na određenoj temperaturi doći do pojave senzibilizacije. Dijagram se koristi kako bi se moglo predvidjeti u kojim će uvjetima doći do izlučivanja karbida i kako bi se ta pojava mogla uspješno izbjeći. Prikazano je više krivulja, ovisno o udjelu ugljika. Ako je režim hlađenja podešen tako da krivulja hlađenja prolazi lijevo od ucrtanih linija, neće doći do izlučivanja karbida tj. do pojave senzibilizacije. Vrijeme inkubacije je to kraće što je sadržaj ugljika viši.



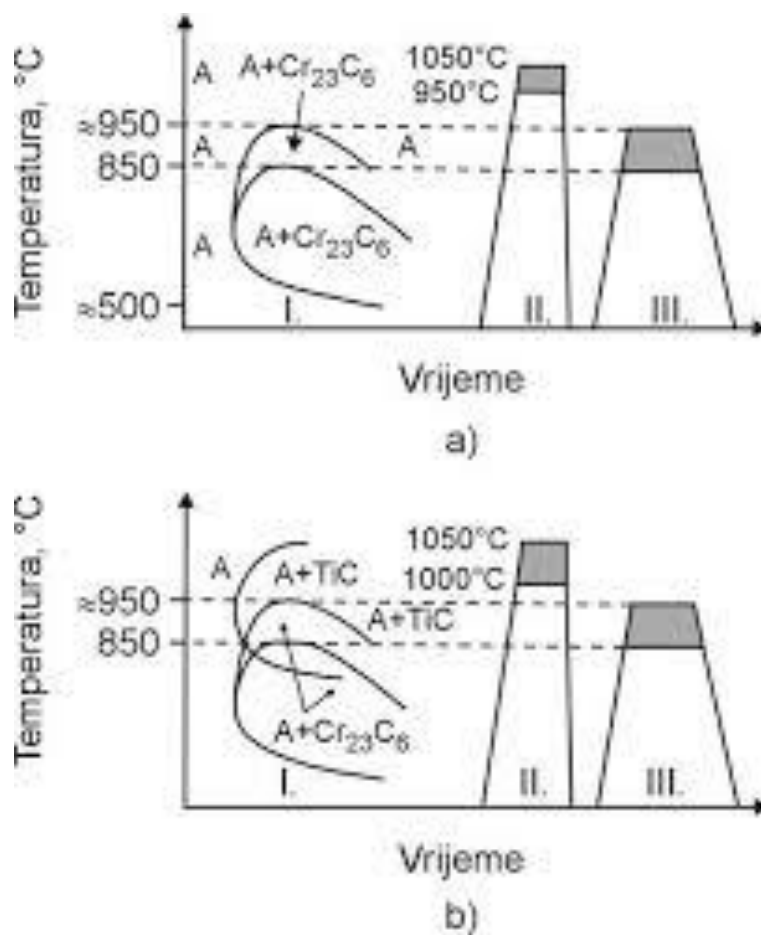
**Slika 5. Utjecaj sadržaja ugljika na početak izlučivanja karbida kod Fe-C legure s 18% kroma i 8% nikla [4]**

Pojava senzibilizacije može se spriječiti na različite načine. Najčešća rješenja su:

- smanjenje udjela ugljika u lijevu
- povećanje udjela legirnih elemenata karbidotvoraca koji će tvoriti stabilnije karbide od kroma (primjerice niobij ili titan) [2].

Na slici 6 može se vidjeti kako stabilizirajući legirni element titanij djeluje na sprječavanje nastanka nepoželjnih kromovih karbida tipa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Iz dijagrama se jasno može vidjeti da će se kod nestabiliziranog lijeva (a) izlučiti  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  karbidi, a kod stabiliziranog lijeva (b) se umjesto njih izlučuju  $\text{TiC}$  karbidi.





Slika 6. Shematski prikaz toplinske obrade nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) nehrđajućeg čeličnog lijeva [4]

## 4. TROŠENJE MATERIJALA

Mehaničko trošenje materijala definira se kao postupni gubitak materijala s površine nekog krutog dijela koje je u dinamičkom dodiru s drugim dijelom. Jedan dio je uvijek kruto tijelo, a drugi dio može biti kruto tijelo ili fluid i/ili čestica. Rezultat trošenja je ili odnošenje materijala s površine nekog strojnog ili konstrukcijskog dijela i smanjenje njegove mase ili samo premještanje materijala s jedne dodirne površine na drugu prilikom čega nema gubitka materijala u smislu čestica trošenja [7].

Trošenje kao pojava može biti poželjno (pisanje olovkom, poliranje, struganje..) ili nepoželjno (u svim strojnim primjenama) ponašanje materijala.

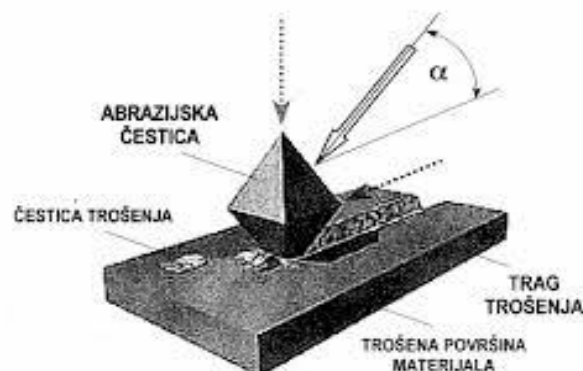
Svi mehanizmi trošenja mogu se svrstati u jedan od sljedeća četiri:

- abrazijski mehanizam trošenja
- adhezijski mehanizam trošenja
- umor površine
- tribokorozijski mehanizam trošenja.

### 4.1 Abrazijsko trošenje materijala

Kod abrazijskog mehanizma trošenja dolazi do istiskivanja materijala. Istiskivanje materijala na dijelu koji se troši uzrokovano je tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Do abrazije dolazi kada neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini s kojom su u direktnom fizičkom kontaktu [7].

Na slici 7 prikazan je teorijski model abrazijskog mehanizma trošenja. Abrazijska čestica je predočena kao pravilna četverostrana piramida čiji rub pod određenim kutom prodire u površinu mekšeg materijala. Uslijed relativnog gibanja dolazi do mikrorezanja i gubitka materijala.



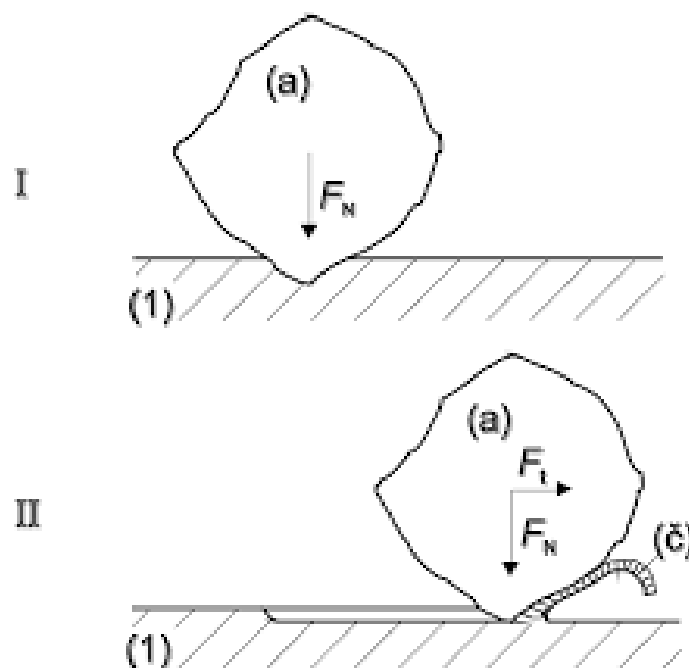
Slika 7. Teorijski model abrazije [8]

Svaki mehanizam trošenja može se opisati jediničnim događajem.

Na slici 8 prikazan je jedinični događaj abrazijskog trošenja, koji se u literaturi može pronaći i kao realni model abrazije. Temelji se na činjenici da su abrazijske čestice u prirodi uglavnom nepravilne geometrije.

Prva faza (na slici 8 gore) abrazije je prodiranje abraziva u površinu mekšeg materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja.

Druga faza (na slici 8 dolje) abrazije je istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja.



Slika 8. Jedinični događaj abrazije [7]

Mehanizam abrazije moguće je analizirati na različite načine [7].

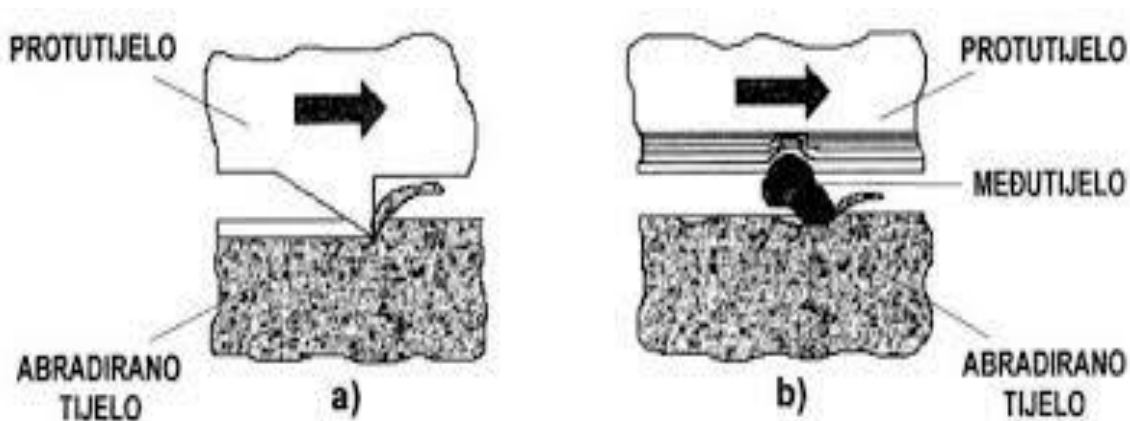
S obzirom na strukturu tribosustava u kojem se abrazija zbiva postoje dva oblika abrazije:

- Abrazija u dodiru dvaju tijela - dva funkcionalna dijela tribosustava, abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo.

Ovaj oblik abrazije prikazan je na slici 9 a.

- Abrazija u dodiru tri tijela - dva funkcionalna dijela tribosustava, abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo te međutijelo odnosno čestice koje se gibaju slobodno između njih.

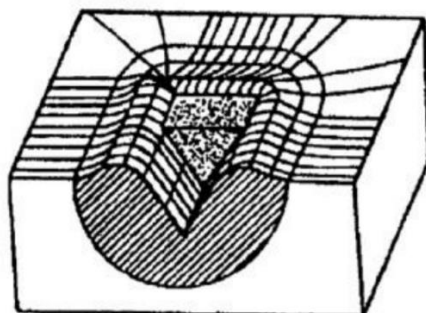
Ovaj oblik abrazije prikazan je na slici 9 b.



Slika 9. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [7]

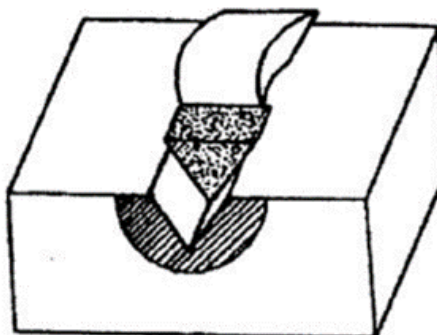
Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine postoji nekoliko abrazijskih mehanizama:

- Mikrobrazdanje – trošenje odnošenjem materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja (slika 10).



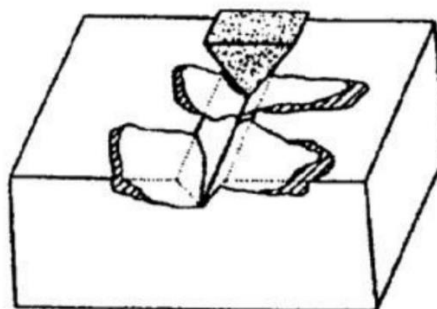
Slika 10. Mikrobrazdanje [7]

- Mikrorezanje – trošenje odnošenjem materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice (slika 11).



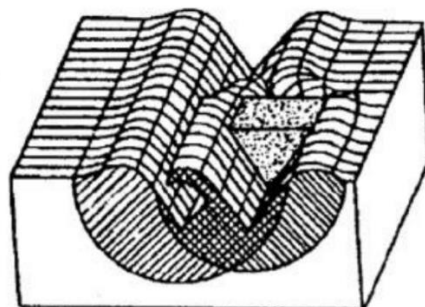
Slika 11. Mikrorezanje [7]

- Mikronaprsnuća – trošenje odnošenjem materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina pri čemu se s površine odnose veliki djelići materijala (slika 12).



Slika 12. Mikronaprsnuća [7]

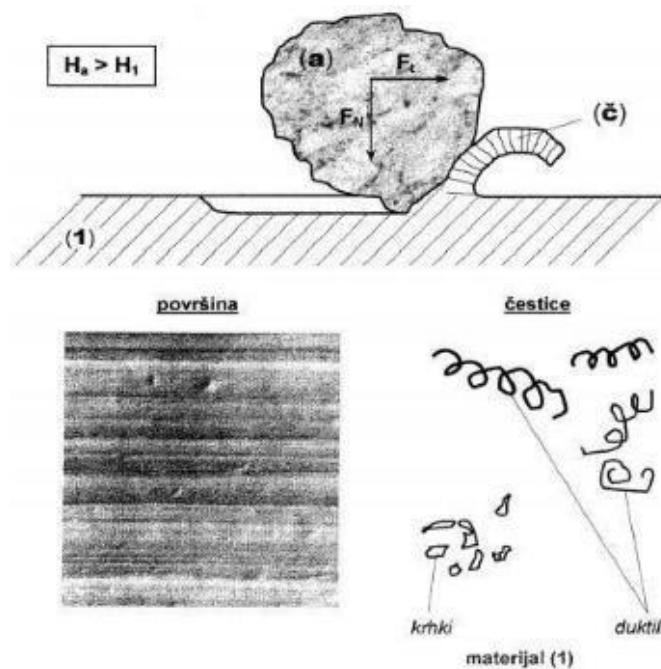
- Mikroumor – trošenje odnošenjem materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem (slika 13).



Slika 13. Mikroumor [7]

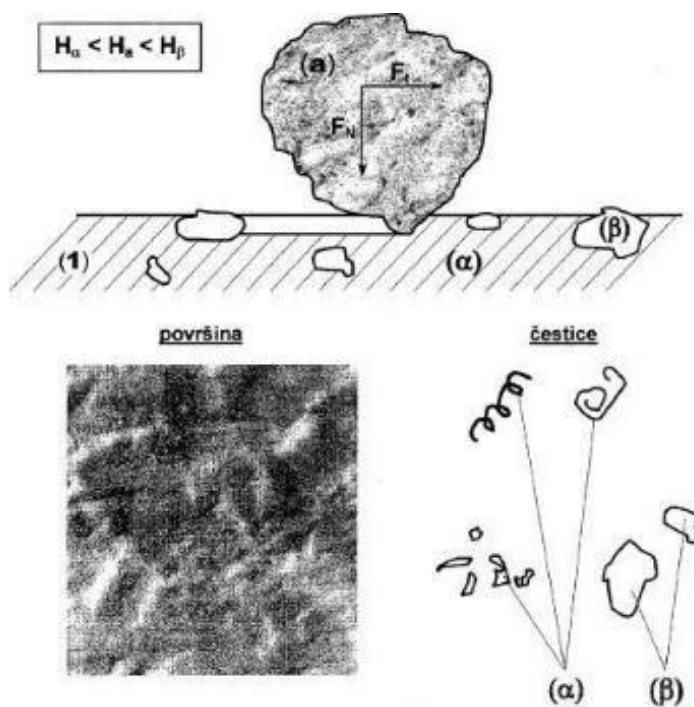
S obzirom na odnos tvrdoće trošene površine i tvrdoće abraziva, moguća su tri različita slučaja abrazije:

- Čista abrazija – nastupit će u uvjetima kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće površine materijala. Kod ovog slučaja površina trošenog dijela ostaje izbrazdana. Ako je materijal trošenog dijela duktilan čestice trošenja su spiralnog oblika, a kod krhkih materijala čestice trošenja poprimaju oblik lomljene strugotine. Slučaj čiste abrazije prikazan je na slici 14.

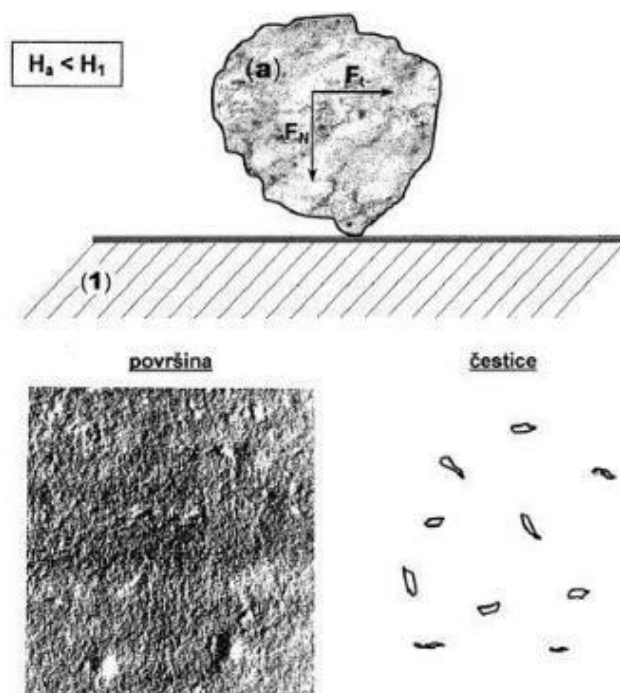


Slika 14. Čista abrazija [7]

- Selektivna abrazija – nastupit će u uvjetima kada u abradiranom materijalu postoji faza koja je tvrđa od abraziva, pa abraziv odnosi samo zahvaćeni sloj mekše faze. Kod ovog slučaja površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake od tvrde faze. Slučaj selektivne abrazije prikazan je na slici 15.
- Nulta abrazija – nastupit će u uvjetima kada je cijela abrazivna površina tvrđa od abraziva. Kod ovog slučaja površina ima polirani izgled, a čestice trošenja su sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenih raznim postupcima oplemenjivanje površine (boriranje, vanadiranje, PVD, CVD). Slučaj nulte abrazije prikazan je na slici 16.



Slika 15. Selektivna abrazija [7]



Slika 16. Nulta abrazija [7]

#### 4.1.1 Kritična veličina abrazivnih čestica

Na proces abrazijskog trošenja utječu mnogi čimbenici, koji se općenito mogu svrstati u tri skupine [7]:

- Svojstva abrazivskih čestica
- Svojstva trošenog materijala
- Radni uvjeti promatranog tribosustava.

Jedan od važnijih čimbenika jest i veličina abrazivnih čestica. Općenito vrijedi da se s povećanjem veličine abrazivnih čestica linearno povećava i trošenje materijala, tj. gubitak mase. Linearnost se zadržava sve do određene veličine abrazivnih čestica koja se naziva kritična veličina abrazivnog zrna. S daljnjim povećanjem veličine abrazivnih čestica može nastupiti jedan od tri sljedeća slučaja [7]:

- nastavlja se linearni gubitak mase, ali u manjoj mjeri
- gubitak mase ostaje konstantan
- dolazi do smanjenja gubitka mase s daljnjim povećanjem veličine zrna.

Na slici 17 prikazana su sva tri navedena slučaja.



Slika 17. Utjecaj veličine zrna na intenzitet abrazijskog trošenja [7]



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1 Cilj rada

Osnovni cilj rada je ispitati kako formiranje karbida po granicama zrna utječe na tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje nehrđajućeg austenitnog zrna. U tu svrhu, materijal je bio podvrgnut toplinskoj obradi te su provedena ispitivanja abrazijske otpornosti prije i nakon toplinske obrade. Osim ispitivanja abrazijske otpornosti, analizirana je mikrostruktura i izmjerena je mikrotvrdoća ispitnih uzoraka prije i nakon toplinske obrade.

### 5.2 Materijali za ispitivanje

Kao materijal za ispitivanje korištena su dva uzorka austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX5CrNi 19-10.

U tablici 5 prikazan je kemijski sastav lijeva oznake GX5CrNi 19-10.

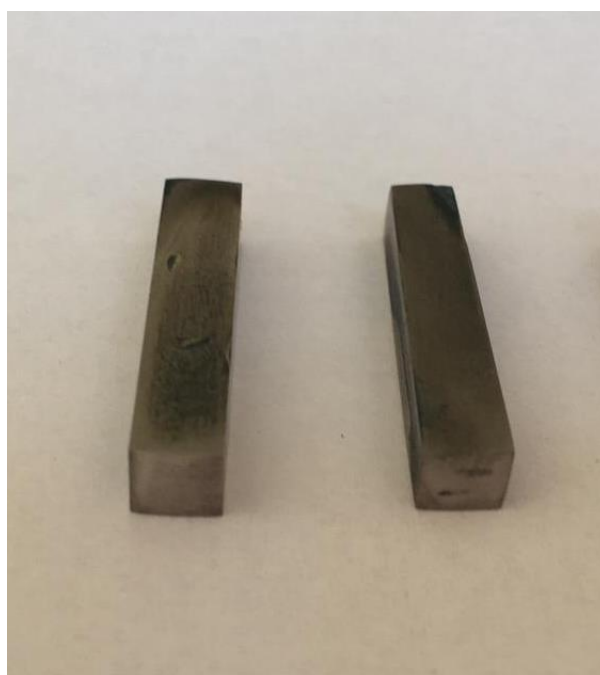
**Tablica 5. Kemijski sastav lijeva oznake GX5CrNi 19-10 [9]**

Kemijski element	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Fe
Maseni udio, %	max 0,07	18-20	9-11	max 1,5	max 1,5	max 0,04	max 0,03	ostatak

Ispitni uzorci su izrezani u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izrezana su dva uzorka iz odljevka. Uzorci su kvadratnog poprečnog presjeka 5×5 mm<sup>2</sup>. Odljevak, kao i izrezani uzorci mogu se vidjeti na slikama 18 i 19.



**Slika 18. Odljevak lijeva oznake GX5CrNi 19-10**



**Slika 19. Izrezani uzorci iz odljevka lijeva oznake GX5CrNi 19-10**

## 5.3 Provođenje ispitivanja

### 5.3.1 Toplinska obrada austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva u vakuumskoj peći

Vakuumska peć u kojoj je provedena toplinska obrada uzorka nalazi se u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i može se vidjeti na slici 20.

Vakuuum služi kao zaštitna atmosfera u procesu toplinske obrade. Uklanjanjem zraka iz komore za toplinsku obradu omogućena je obrada predmeta bez oksidacije površine i razgradnje postojećih oksida. Ispitni uzorci su metalno svijetli i nakon toplinske obradbe. Kao sredstvo za gašenje koristi se inertni plin dušik koji se unosi u vakuumsku komoru u fazi hlađenja. Najveća prednost vakuumskih peći je visoka čistoća površine bez uključaka i oksida nakon postupka toplinske obrade te nema pojave razugljičenja. Također, značajno su manje deformacije i promjene mjera u odnosu na ostale načine toplinske obrade.

Uzorak je podvrgnut toplinskoj obradi u trajanju od 1 h na temperaturi od 750 °C. Bilo je potrebno 20 minuta kako bi se postigla željena temperatura od 750 °C. Hlađenje je provedeno cirkulacijom dušika u trajanju od otprilike 5 minuta.

Parametri toplinske obrade odabrani su kako bi se na granicama austenitnih izazvalo formiranje karbida te potom usporedila svojstva prije i nakon toplinske obrade.



Slika 20. Vakuumska peć

### 5.3.2 Ispitivanje abrazijske otpornosti

Abrazijska otpornost ispitana je na uređaju Taber abrader u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj se može vidjeti na slici 21.



Slika 21. Taber abrader

Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je na dva uzorka, na dvije kvalitete brusnog papira, P220 i P500.

U tablici 6 prikazani su brusni papiri korišteni za ispitivanje zajedno s pripadnom prosječnom veličinom abrazivnih čestica.

Tablica 6. Brusni papiri

Kvaliteta brusnog papira	Srednji promjer abrazivnog zrna [ $\mu\text{m}$ ]
P500	30,2
P220	68

Na svakom uzorku provedena su tri ciklusa trošenja po 100 okretaja, za svaku kvalitetu brusnog papira. Ispitni uzorak postavlja se u nosač, steže se te se oslanja na površinu abrazivnog papira konstantnom silom tijekom svih ispitivanja. Uređaj rotira brzinom od 1 o/s dok obodna brzina na rubu diska (promjera 125 mm) iznosi 0,251 m/s. Uzorci su pritisnuti na brusni papir silom od 4,91 N. Za stotinu okretaja ukupna duljina trošenja iznosi 25 m.

Intenzitet trošenja se prikazuje preko gubitka mase, zato što svi uzorci imaju istu gustoću.

Masa uzoraka mjerena je na vagi u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Vaga se može vidjeti na slici 22.

Masa svakog uzorka mjerena je prije i nakon svakog ciklusa trošenja od 100 okretaja.



**Slika 22. Vaga**

### 5.3.3 Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2

Abrazijska otpornost i tvrdoća materijala su usko povezana svojstva, ali nisu potpuno jednoznačna. Što je tvrdoća materijala veća, otpornost na abrazijsko trošenje trebala bi također biti veća. Kako bi se pružio bolji uvid u povezanost ovih svojstava, na svim uzorcima provedeno je mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju PMT-3, metodom prema Vickersu gdje je indentor četverostrana dijamantna piramida. Izmjerene su vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 pri opterećenju utegom mase od 200 g, prije i nakon toplinske obrade. Provedeno je pet mjerenja mikrotvrdoće te je izračunata srednja vrijednost.

Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće može se vidjeti na slici 23.



**Slika 23.** Uređaj za mjerenje tvrdoće



### 5.3.4 Analiza mikrostrukture

Kako bi se mikrostruktura mogla pravilno analizirati, uzorak treba biti pripremljen na odgovarajući način. Uzorak treba biti reprezentativan dio odljevka - sva oštećenja površine metala zbog mehaničke deformacije moraju biti uklonjena, ne smije biti ogrebotina i jamica te mora biti dovoljno ravan.

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju, na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitni uzorci su najprije zaliveni u polimernu masu, zatim su brušeni, polirani i nagriženi kako bi se jasno vidjela mikrostruktura uzoraka. Toplinski neobrađeni uzorci nagriženi su elektrokemijski, a toplinski obrađeni uzorci kemijski u sredstvu čiji je sastav sljedeći:

- 100 ml vode
- 300 ml klorovodične kiseline
- 15 ml vodikovog peroksida.

Nagrižanje u navedenom sredstvu je trajalo 1-2 sekunde.

Površina poliranih i nagriženih uzoraka analizirana je na optičkom mikroskopu OLYMPUS GX 51 pri povećanjima  $50\times$ ,  $100\times$ ,  $200\times$ ,  $500\times$  i  $1000\times$ .

Mikroskop je prikazan na slici 24.



**Slika 24. Optički mikroskop**

## 5.4 Rezultati provedenih ispitivanja

### Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade prikazani su u tablicama 7 i 8.

**Tablica 7.      Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade na brusnom papiru P220**

P220		
BRUSNI PAPIR	CIKLUS TROŠENJA	GUBITAK MASE (mg)
Uzorak 1	1	7,8
	2	6,1
	3	5,9
Uzorak 2	1	7,1
	2	6,3
	3	6,5
Srednja vrijednost gubitka mase		6,6

**Tablica 8.      Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade na brusnom papiru P500**

P500		
BRUSNI PAPIR	CIKLUS TROŠENJA	GUBITAK MASE (mg)
Uzorak 1	1	3,0
	2	2,4
	3	3,0
Uzorak 2	1	3,5
	2	4,4
	3	3,5
Srednja vrijednost gubitka mase		3,3



Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje poslije toplinske obrade prikazani su u tablicama 9 i 10.

**Tablica 9. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje poslije toplinske obrade na brusnom papiru P220**

P220		
BRUSNI PAPIR	CIKLUS TROŠENJA	GUBITAK MASE (mg)
Uzorak 1	1	5,7
	2	6,2
	3	5,6
Uzorak 2	1	7,6
	2	6,5
	3	10,0
Srednja vrijednost gubitka mase		6,9

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje poslije toplinske obrade na brusnom papiru P500**

P500		
BRUSNI PAPIR	CIKLUS TROŠENJA	GUBITAK MASE (mg)
Uzorak 1	1	3,2
	2	3,5
	3	4,0
Uzorak 2	1	3,0
	2	4,0
	3	3,4
Srednja vrijednost gubitka mase		3,5

### Rezultati mjerenja mikrotvrdoće

Rezultati mjerenja tvrdoće prije toplinske obrade prikazani su u tablici 11, a poslije toplinske obrade u tablici 12. Provedeno je po 5 mjerenja i izračunata je srednja vrijednost mikrotvrdoće.

**Tablica 11.      Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 prije toplinske obrade**

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzoraka - HV0,2
1	151
2	151
3	155
4	148
5	126
Srednja vrijednost	146,2

**Tablica 12.      Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 nakon toplinske obrade**

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzoraka - HV0,2
1	151
2	107
3	145
4	135
5	153
Srednja vrijednost	138,2

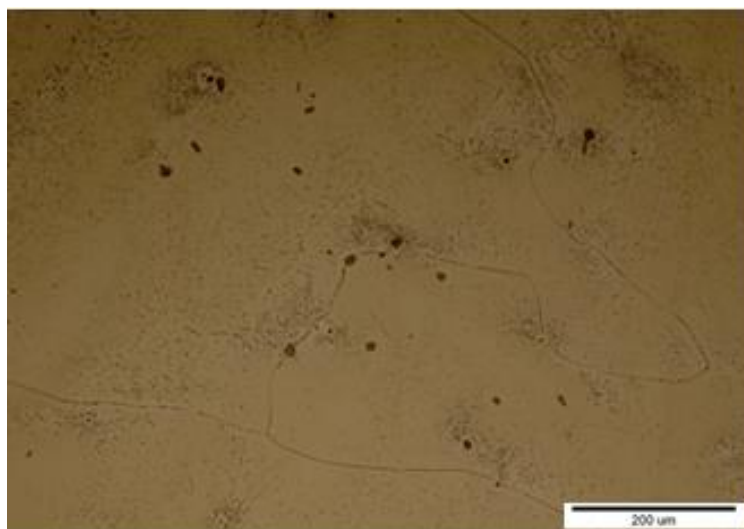
### Rezultati analize mikrostrukture

Na slici 25 može se vidjeti pripremljeni uzorak za ispitivanje mikrostrukture austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva. Pri analizi mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti.



**Slika 25. Pripremljen uzorak za ispitivanje mikrostrukture**

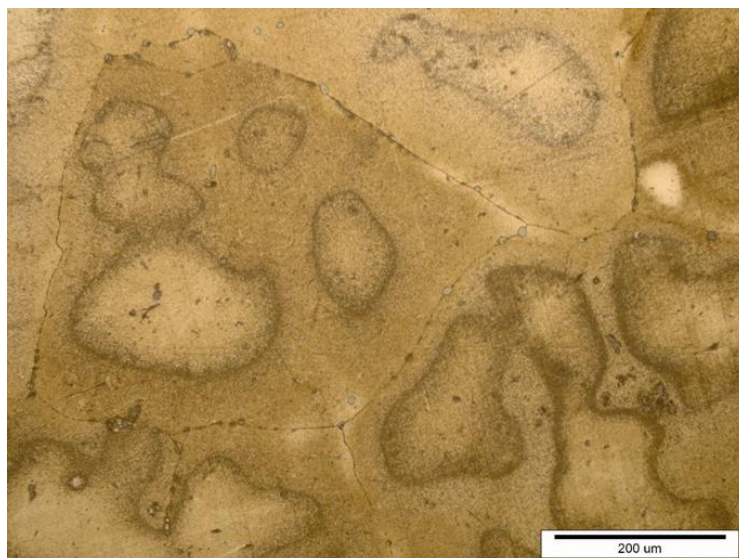
Na slici 26 vidljiva je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva u nagrizenom stanju prije toplinske obrade, snimljena pri povećanju 200×. Mikrostruktura je monofazna, sastoji se samo od austenita.



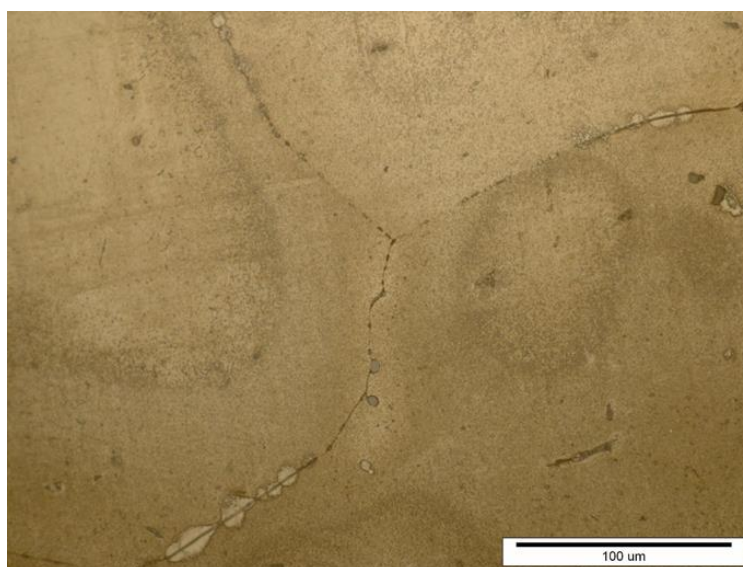
**Slika 26. Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10, snimljena prije toplinske obrade pri povećanju 200×**

Na slikama 27 i 28 vidljiva je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva poslije toplinske obrade u nagriženom stanju, snimljene pri povećanjima  $200\times$  i  $500\times$ .

Na fotografijama mikrostrukture vide se izlučeni sitni karbidi po granicama austenitnih zrna. S obzirom na sastav lijeva najvjerojatnije se radi o kromovim karbidima tipa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ .



**Slika 27.** Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10 , snimljena poslije toplinske obrade pri povećanju  $200\times$



**Slika 28.** Mikrostruktura lijeva oznake GX5CrNi 19-10, snimljena poslije toplinske obrade pri povećanju  $500\times$

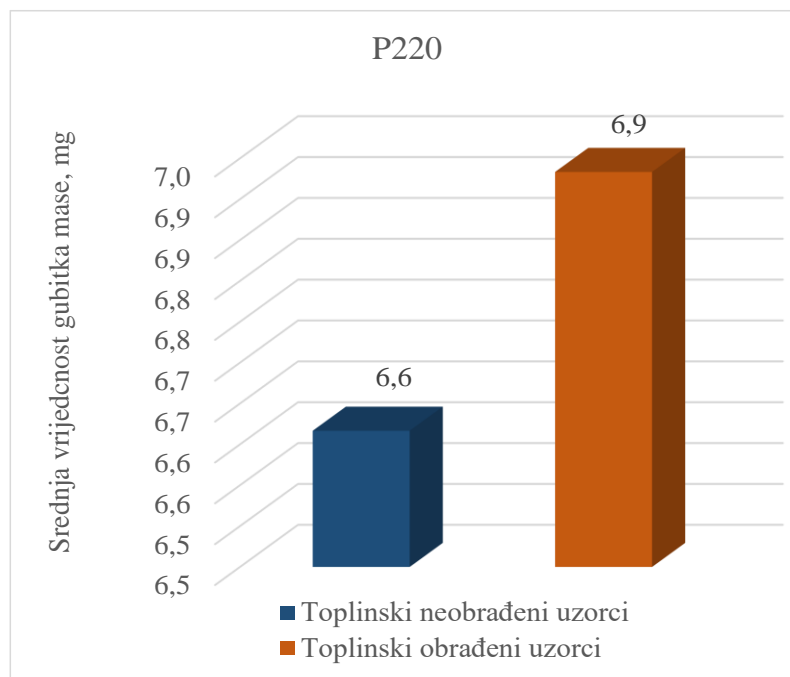
## 5.5 Analiza rezultata

### Utjecaj toplinske obrade na rezultate ispitivanja abrazijskog trošenja

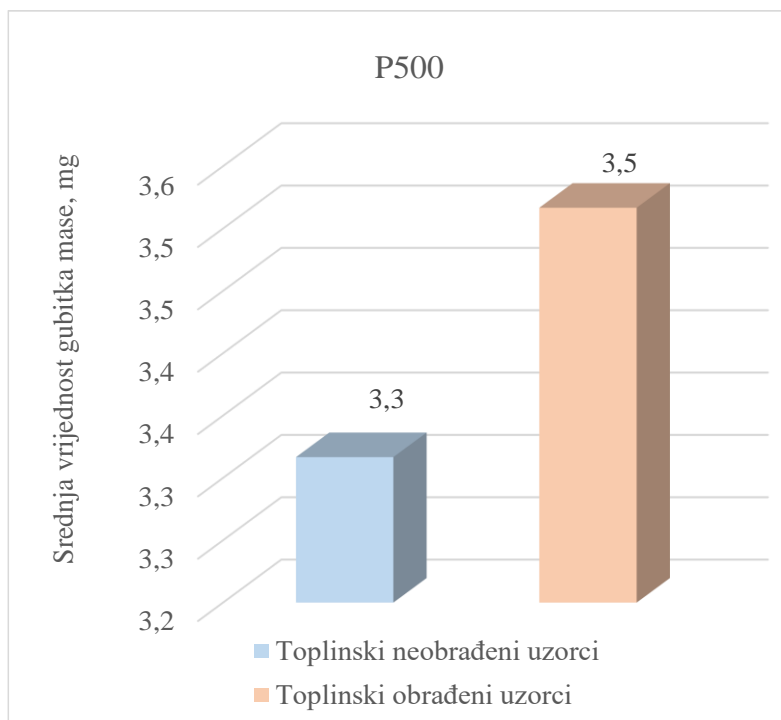
Na slikama 29 i 30 su dijagramski prikazane srednje vrijednosti gubitka mase za toplinski neobrađene i obrađene uzorke. Iz dijagrama se može vidjeti da promjena mikrostrukture izazvana grijanjem uzoraka na 750 °C u trajanju od 1 h smanjuje otpornost na abrazijsko trošenje, tj. povećava intenzitet abrazijskog trošenja kod oba brusna papira.

Promjena mikrostrukture očituje se kroz sljedeća dva mehanizma:

- Žarenje austenitnog nehrđajućeg lijeva oznake GX5CrNi 19-10 s 0,02 % C na 750 °C izaziva promjene u kemijskom sastavu austenitnog zrna. To se događa zbog izlučivanja kromovih karbida po granicama austenitnih zrna što izaziva smanjenje udjela kroma i ugljika u samom zrnu. Iz literature je poznato da najčešće nastaju karbidi tipa  $\text{Cr}_2\text{C}_6$ . Ovako osiromašena austenitna matrica pruža manju otpornost prema abrazijskom mehanizmu trošenja i zato je gubitak mase žarenih uzoraka pri abraziji veći.
- Žarenje također izaziva i povećanje austenitnog zrna što direktno utječe na smanjenje ukupne duljine granica zrna. Kako granice zrna predstavljaju nepravilnost u kristalnoj građi te mjesta s povišenom čvrstoćom i tvrdoćom, njihovo smanjenje doprinosi povećanju intenziteta abrazijskog trošenja.



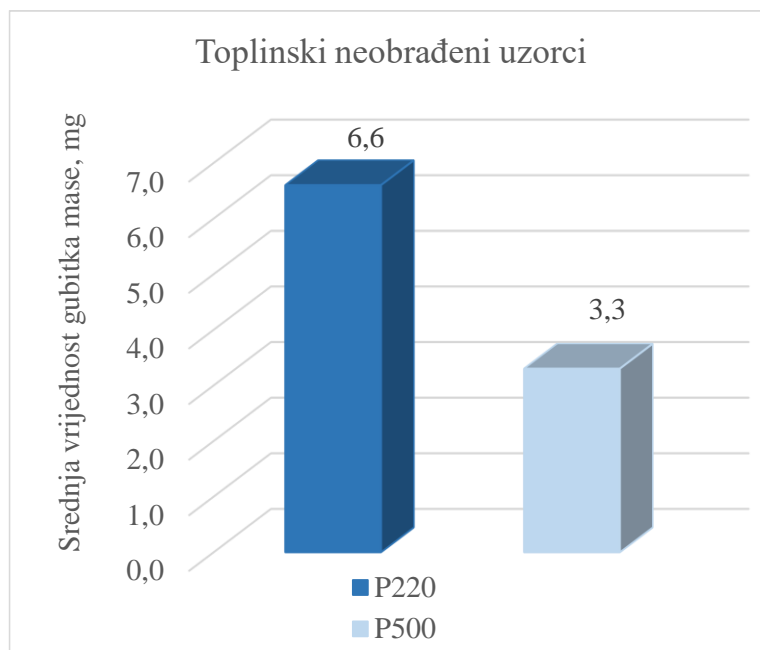
Slika 29. Rezultati trošenja na papiru P220



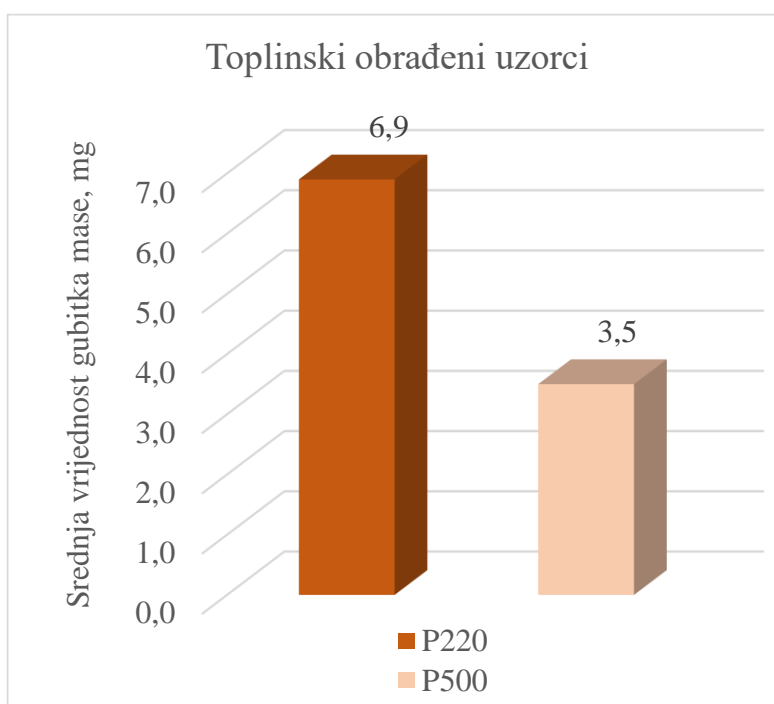
**Slika 30. Rezultati trošenja na papiru P500**

#### Utjecaj veličine abrazivnih zrna na intenzitet abrazijskog trošenja

Na slikama 31 i 32 su dijagramski prikazane srednje vrijednosti gubitka mase za oba brusna papira. Na grubljem brusnom papiru P220 trošenje je intenzivnije i kod toplinski neobrađenih uzoraka i kod toplinski obrađenih uzoraka. Veličina abrazivnih zrna ima veći utjecaj kod toplinski obrađenih uzoraka, jer je veća apsolutna razlika u gubitku mase (3,4 mg u odnosu na 3,3 mg).



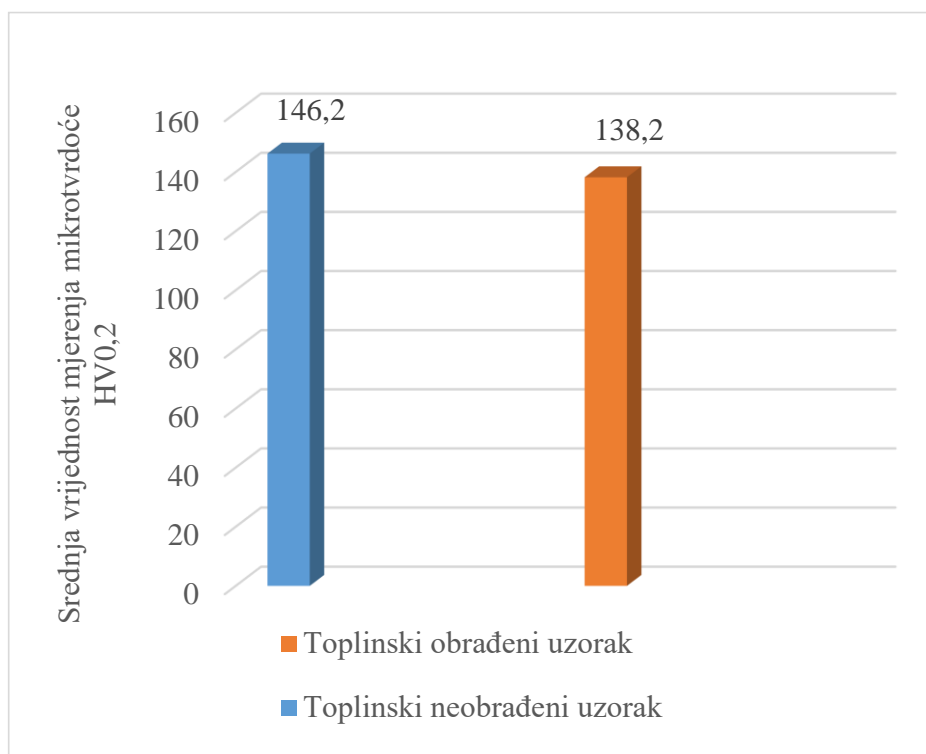
Slika 31. Rezultati trošenja toplinski neobrađenih uzoraka na oba brusna papira



Slika 32. Rezultati trošenja toplinski obrađenih uzoraka na oba brusna papira

### Utjecaj toplinske obrade na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Na slici 33 su dijagramski prikazane srednje vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 kod toplinski neobrađenih i toplinski obrađenih uzoraka. Tvrdoća toplinski neobrađenih uzoraka malo je viša od tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka, kod kojih je došlo do prije opisanih mikrostrukturnih promjena. Kromovi karbidi izlučeni po granicama austenitnog zrna imaju vrlo visoku tvrdoću, ali njihovo formiranje ne povećava integralnu tvrdoću zato što im je volumni udio vrlo nizak. Istodobno, nastankom karbida smanjuju se udjeli ugljika i kroma otopljenih u kristalnim zrnima austenita, što također doprinosu smanjenju integralne tvrdoće. Dobiveni rezultati podudaraju se s rezultatima mjerenja otpornosti na abrazijsko trošenje. Niže vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su kod toplinski obrađenih uzoraka koji su se ujedno i manje trošili.



**Slika 33. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 uzoraka**



## ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Žarenjem austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX5CrNi 19-10 na 750 °C u trajanju od jednog sata, narušava se početna 100%-tna austenitna mikrostruktura. Dolazi do povećanja austenitnog zrna, a po granicama zrna izlučuju se kromovi karbidi što dovodi do smanjenja udjela ugljika i kroma u austenitnoj matrici.
- Navedene mikrostrukturne promjene smanjuju otpornost na abrazijsko trošenje. Smanjenje otpornosti izraženije je na grubljem brusnom papiru.
- Veličina abrazivnih čestica znatno utječe na otpornost na abrazijsko trošenje toplinski obrađenih kao i toplinski neobrađenih uzoraka. U oba slučaja se otpornost na abrazijsko trošenje povećava s povećanjem kvalitete brusnog papira od P220 na P500. Porast otpornosti na abrazijsko trošenje izraženiji je kod toplinski obrađenih uzoraka.
- Povećanjem austenitnog zrna i formiranjem kromovih karbida po granicama zrna smanjuje se mikrotvrdoća lijeva. Smanjenje mikrotvrdoće može se direktno povezati sa smanjenjem otpornosti na abrazijsko trošenje.

## LITERATURA

- [1] V. Rede: Posebni metalni materijali, autorizirana predavanja, Zagreb 2019.
- [2] V. Rede: Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] L. Ćurković, V. Alar: Kemijska postojanost materijala, autorizirana predavanja, Zagreb 2019.
- [4] S. Kožuh: Specijalni čelici-skripta, Sisak, 2010.
- [5] [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Korozijski%20postojani%20ljevovi%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Korozijski%20postojani%20ljevovi%20(1).pdf)  
[dostupno dana 1.9.2020.]
- [6] [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/brkic\\_2020\\_zavrzni\\_preddiplomski%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/brkic_2020_zavrzni_preddiplomski%20(2).pdf)  
[dostupno dana 1.9.2020.]
- [7] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić: Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [8] G. Heffer, „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb 2002.
- [9] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4308-GX5CrNi19-10-Cast-Stainless-Steel> [dostupno dana 1.9.2020.]

## **PRILOZI**

1. CD-R disk