

# Otpornost na trošenje korozijski postojanih čelika

---

**Grubišić, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:254883>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Josip Grubišić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# Otpornost na trošenje korozijski postojanih čelika

Mentori:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Josip Grubišić

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na mentorstvu i stručnoj pomoći. Također mu dugujem zahvalnost za savjete koje mi je davao i zalaganje koje je poduzimao tokom moga rada. Velika zahvala i asistentu mag.ing. Ivanu Primorcu na pomoći i zalaganju.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja me je podupirala od početka studiranja i prijateljima koji su uvijek bili tu kad sam ih trebao.

Josip Grubišić



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске 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:	
H-broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **JOSIP GRUBIŠIĆ** Mat. br.: 0035196498

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OTPORNOST NA TROŠENJE KOROZIJSKI POSTOJANIH ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR RESISTANCE OF CORROSION RESISTANCE STEELS**

Opis zadatka:

Korozijski postojani čelici primjenjuju se kada se želj sprječiti: razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija, a zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Ukoliko se pri tome javljaju i određeni procesi mehaničkog trošenja poželjna je i njihova tribološka otpornost. Jedna od brojnih primjena nehrđajućih čelika je i izrada različitih vrsta ograda. Ovisno o podnehlju (bližina mora) koriste se i različite vrste nehrđajućih čelika. U ovom radu je potrebno:

- 1) Dati kratki pregled korozijski postojanih čelika koji se najčešće koriste za izradu ograda.
- 2) Opisati način izrade ograda od ovih materijala.
- 3) Izraditi uzorke od različitih korozijski postojanih čelika.
- 4) Ispitati otpornost uzoraka na neki mehanizam trošenja.
- 5) Provesti prateća ispitivanja te dati zaključak.

Zadatak zadat:

31. studenog 2016.

Zadatak zadan:

*Krešimir Grilac*

Prof.dr.sc. Krešimir Grilac

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

*Branko Bajer*

Izv. prof. dr. sc. Branko Bajer

# SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI .....	2
2.1. Općenito o nehrđajućim čelicima.....	2
2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika .....	2
2.2.1. Krom .....	2
2.2.2. Nikal.....	2
2.2.3. Molibden .....	3
2.2.4. Titan.....	3
2.3. Podjela nehrđajućih čelika .....	3
2.3.1. Feritni nehrđajući čelici .....	4
2.3.2. Austenitni nehrđajući čelici .....	5
2.3.3. Martenzitni nehrđajući čelici.....	7
2.3.4. Dupleks čelici .....	8
2.3.5. Precipitacijski očvrsnuti čelici.....	9
2.4. Mehanička i fizikalna svojstva nehrđajućih čelika.....	11
2.4.1. Mehanička svojstva nehrđajućih čelika.....	11
2.4.2. Umor materijala .....	12
2.4.3. Fizikalna svojstva .....	13
3. TROŠENJE.....	14
3.1. Abrazija.....	14
3.1.1. Teorijska abrazija.....	14
3.1.2. Realna abrazija .....	15
3.1.3. Otpornost na abraziju.....	16
3.1.4. Popis osnovnih metoda .....	17
4. METODA “SUHI PIJESAK/ GUMENI KOTAČ” .....	18
4.1. Opis metode “suhi pijesak/ gumeni kotač” .....	18
4.2. Uređaj za provedbu metode “suhi pijesak/ gumeni kotač” .....	19

---

4.2.1. Gumeni kotač .....	19
4.2.2. Abraziv .....	19
4.2.3. Mlaznica za pijesak .....	20
4.2.4. Pogonski motor .....	21
4.3. Ultrazvučni uređaj za čišćenje uzoraka .....	21
4.3.1. Karakteristike procesa .....	21
4.3.2. Princip rada .....	22
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	23
5.1 OTPORNOST NA ABRAZIJSKO TROŠENJE .....	23
5.2. TVRDOĆA .....	27
5.3. MIKROSTRUKTURA .....	28
6. ZAKLJUČAK .....	36
7. LITERATURA .....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [2] .....	4
Slika 2. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [4] .....	6
Slika 3. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [5].....	7
Slika 4. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [6] .....	9
Slika 5. Dijagram naprezanja za različite čelike [8].....	12
Slika 6. Teorijski model abrazije [10] .....	15
Slika 7. Jedinični događaj abrazije [9] .....	16
Slika 8. Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" (Laboratorij za tribologiju FSB-a) .....	18
Slika 9. Shematski prikaz uređaja za test "suhi pijesak/ gumeni kotač" [12].....	19
Slika 10. Ultrazvučni uređaj za čišćenje uzorka.....	22
Slika 11. Vaga Metler B5C 1000 [4].....	24
Slika 12. Prikaz trošenja uzorka .....	24
Slika 13. Prosječni gubitak mase uzorka nakon 1000 okretaja .....	25
Slika 14. Trag trošenja materijala .....	26
Slika 15. Krivulje trošenja materijala.....	26
Slika 16. Tvrdomjer sa dijamantnom prizmom.....	27
Slika 17. Pripremljen uzorak za analizu .....	29
Slika 18. Eksikator sa silika-gel zrnima .....	29
Slika 19. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51 .....	30
Slika 20. AISI 304 (A2) povećanje 100x .....	31
Slika 21. AISI 316 (A4) povećanje 100x .....	31
Slika 22. AISI 304 (A2) povećanje 200x .....	32
Slika 23. AISI 316 (A4) povećanje 200x .....	32
Slika 24. AISI 304 (A2) povećanje 500x .....	33
Slika 25. AISI 316 (A4) povećanje 500x .....	33
Slika 26. AISI 304 (A2) povećanje 1000x .....	34
Slika 27. AISI 316 (A4) povećanje 1000x .....	34



# POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva nekih nehrđajućih čelika [7] .....	11
Tablica 2. Fizikalna svojstva nehrđajućih čelika [8] .....	13
Tablica 3. Rezultati mjerenja mase uzoraka prilikom abrazijskog trošenja.....	23
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće na 3 različita mjesta na materijalu .....	28
Tablica 5. Prosječna tvrdoća .....	28

# POPIS OZNAKA

$\alpha$  – kut upada

$F_N$  – normalna komponenta opterećenja

$F_t$  – tangencijalna komponenta opterećenja

## SAŽETAK

U ovome radu ispitivana je otpornost na abraziju i tvrdoću dva korozijski postojana čelika. Čelici koji su uspoređivani su AISI 304 (A2, X5CrNi18-10 ) i AISI 316 (A4, X5CrNiMo17-12-2).

Abrazijsko trošenje ispitivalo se uz pomoću metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“ (“dry sand/ rubber wheel“). Dobiveni rezultati su prikazani tablično i grafički u nastavku.

Tvrdoća je ispitivana na tvrdomjeru sa dijamantnom prizmom (Vickers metoda) uz pomoć utega od 200g dok je mikrostruktura poslikana svjetlosnim mikroskopom pri različitom povećanju.

Ključne riječi: trošenje, abrazija, tvrdoća, mikrostruktura

## SUMMARY

In this paper abrasion wear and hardness of two corrosion resistant steel alloys is compared. Compared steel alloys are AISI 304 (A2) and AISI 316 (A4).

Method for testing abrasion wear is ("dry sand/ rubber wheel". Results are shown later in the paper.

Hardness is evaluated with diamond indenter (Vickers method) and 200g weight, while microstructure has been evaluated with light microscope.

Key word: wear, abrasion, hardness, microstructure

# 1. UVOD

Korozijski postojani čelici se koriste za različite svrhe gdje trošenje nije primarna funkcija. Materijali koji su ovdje obrađeni izrezani su u kućnoj radionici i namijenjeni su za izradu inox (sinonim za nehrđajući čelik) ograda. Ograde se prave na način da prvo uzimamo mjere sa mjesta rada. Nakon toga izrezujemo cijevi na potrebne duljine te željeni oblik dobivamo zavarivanjem. Na licu mjesta postavljamo prvo stupove na koje dolazi rukohvat te se sve postavlja pod libelu prije završnog stezanja. Postupak je podložan promjenama ovisno o izgledu ograde.

Materijal AISI 316 (A4) ima veći udio molibdena te se koristi u primorskim područjima. Razlog tomu je što u blizini morske obale atmosfera sadrži halogenide (osobito kloride) koji padaju na materijal i talože se na njemu. S vremenom dolazi do veće koncentracije klorida na materijalu nego u zraku. Ista stvar se događa i u kontaktu sa morskom vodom, tako da je potrebna veća otpornost na koroziju.

Materijal AISI 304 (A2) je najkorištenija vrsta nehrđajućeg čelika. Dobro se oblikuje i zavaruje a pretežno se koristi u kontinentalnim dijelovima.

Ovi materijali mogu se koristiti u različite svrhe kao što su: auto-dijelovi, pribor za jelo i kuhanje, tlačni spremnici, alati i uređaji u prehrambenoj industriji, dijelovi kućanskih aparata, uređaji u medicini itd.

Trošenje je većinom štetno; uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i umor materijala.

Glavni legirni elementi korozijski postojanih čelika su krom, nikal i molibden.

Korozijski postojani čelici imaju dobru otpornost na koroziju i to im je primarno svojstvo koje dolazi do izražaja. Pošto su svakodnevno kao i svi ostali materijali izloženi i trošenju u ovom radu biti će ispitana otpornost prema istome te ustvrditi koje su tvrdoće korištenih materijala.

## 2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

### 2.1. Općenito o nehrđajućim čelicima

Nehrđajući čelici su legure koje sadrže najmanje 50 % željeza i minimum 10,5 % kroma . S udjelom kroma iznad 10,5 %, izloženosti zraku ili vodi rezultira spontanom stvaranjem tankog stabilnog oksidnog filma obogaćenog kromom. Ovaj film pruža visoku zaštitu, film ukoliko je oštećen abrazijom brzo se ponovo formira. Mehanizam zaštite pasivnim filmom se pojavljuje i kod drugih materijala značajnije kod aluminija i titana.

Legirni elementi utječu na stabilnost oksidnog filma i otpornost metala ispod filma na otapanje, koji također i kontroliraju mehaničke i fizikalne značajke čelika. Kontrolirano doziranje legirnih elemenata rezultira širokim spektrom materijala, od kojih svaki nudi svoja svojstva u pogledu čvrstoće i sposobnosti da bude otporan na određenu kemijsku okolinu [1].

### 2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

#### 2.2.1. Krom

Krom je jak karbidotvorac i tvori tvrde karbide od cementita. Karbidi povisuju otpornost na pritisak i otpornost na abrazijsko trošenje. Krom proširuje područje ferita jer je tzv. alfa-geni element. Povećuje prokaljivost tako da se čelici legirani s kromom mogu nakon austenitiziranja hladiti u ulju ili čak na zraku. Uz monofaznu mikrostrukturu i više od 12 %Cr u čvrstoj otopini čelika dobiva se potpuna otpornost na opću koroziju. Udarni rad loma čelika legiranih s kromom je manji nego kod ostalih čelika jednake razine čvrstoće. Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, koja se izbjegava legiranjem s molibdenom. Krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i rastezljivosti [2].

#### 2.2.2. Nikal

Nikal je izraziti gama-geni element tako da su austenitni nehrđajući čelici uobičajeno legirani s Ni. Ne tvori karbide nego se otapa u rešetki željeza. Povećuje žilavost i pri niskim temperaturama. Smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Nikal se najviše koristi kao legirni element kod čelika posebnih svojstva – nehrđajući i kemijski postojani, čelici za povišene i za niske temperature, vatrootporni, nemagnetični čelici. Zbog visoke cijene legira se gotovo uvijek u kombinaciji s nekim drugim elementom [2].

### 2.2.3. Molibden

U pravilu se kombinira s drugim elementima. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i granice puzanja. Kod Cr-Ni i Mn čelika dodaje se da bi smanjio opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja. Molibden povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate mikrostrukture i na povećanje prokaljivosti. Kao jak karbidotvorac doprinosi poboljšanju reznih karakteristika brzoreznih čelika [2].

### 2.2.4. Titan

Titan ima jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku, sumporu. Najjači je karbidotvorac, a njegovi se karbidi teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Usitnjuje zrno i smanjuje opasnost od pregrijavanja. Djeluje na sužavanje austenitnog područja [2]. Titan se dodaje da bi stabilizirao ugljik i poboljšala otpornost koroziji u zoni pod utjecajem topline nastalom zavarivanjem [1].

## 2.3. Podjela nehrđajućih čelika

Kao što postoji široki spektar niskolegiranih čelika sa različitim zahtjevima za čvrstoću, zavarljivost i žilavost tako imamo i široki raspon nehrđajućih čelika prema njihovoj otpornosti na koroziju i čvrstoću. Da bi postigli optimalnu ekonomsku korist nehrđajućih čelika, važno je izabrati adekvatni čelik za pojedinu primjenu, bez za taj slučaj nepotrebnih i skupih legiranih elemenata koji znatno povećavaju cijenu materijala [1].

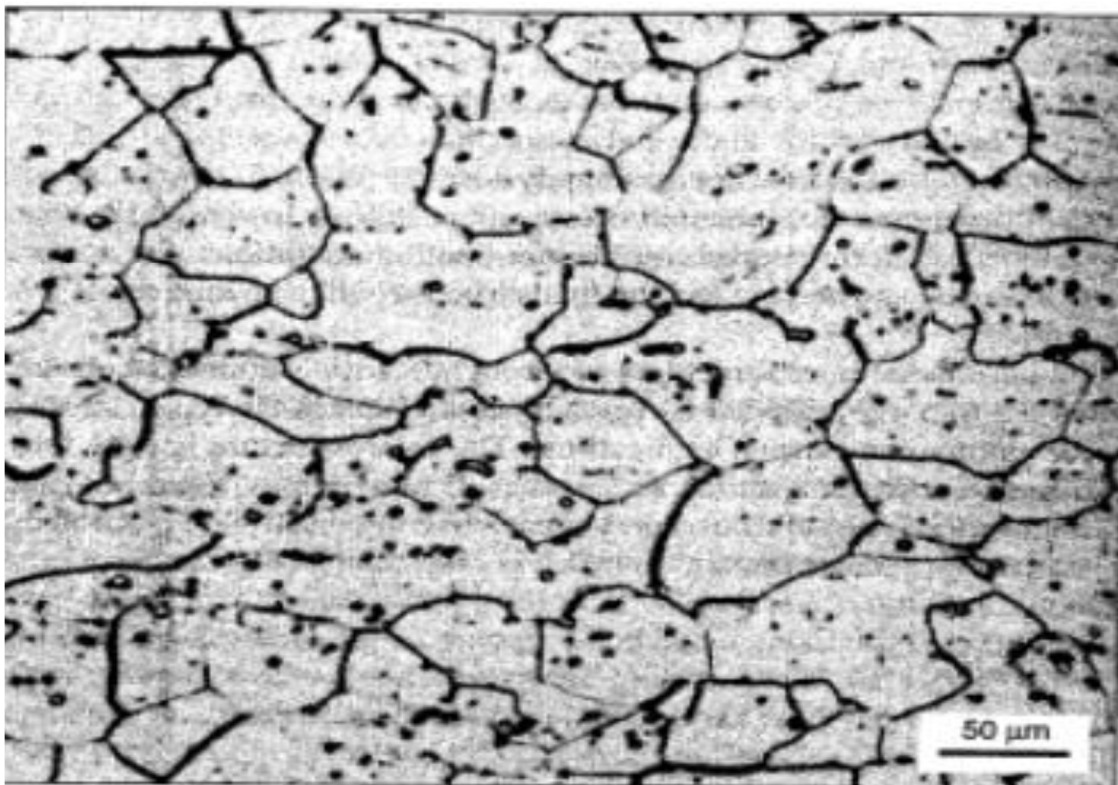
Prema Američkom institutu za željezo i čelik (AISI), nehrđajuće čelike danas dijelimo prema sljedećim skupinama [3]:

- Feritni;
- Austenitni;
- Martenzitni;
- Dupleks;
- Precipitacijski očvrtnuti.

### 2.3.1. Feritni nehrđajući čelici

Sadrže  $<0,1\% \text{C}$  i  $13-17\% \text{Cr}$  i zbog toga zadržavaju feritnu mikrostrukturu pri gotovo svim temperaturama pa se ne mogu zakaliti. Primjenjuju se u brušenom ili fino poliranom žarenom stanju.

Relativno su mekani, relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , te opasnosti od krhkosti „475“ pri duljem držanju pri  $350-520\text{ }^\circ\text{C}$ , kao i zbog mogućeg nastajanja krhke faze pri dugom držanju od  $520-850\text{ }^\circ\text{C}$ . Magnetični su, te slabo oblikovljivi deformiranjem, bolje obradljivi odvajanjem čestica od austenitnih čelika. Niže su cijene od ostalih nehrđajućih čelika. Lomljivi su pri niskim temperaturama. Na sobnoj temperaturi imaju BCC rešetku istu kao i željezo. Slika 1 prikazuje mikrostrukturu feritnog čelika.



Slika 1. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [2]

Feritni nehrđajući čelici nisu otporni na rastaljene metale Al, Sb i Pb, soli i reducirajuće medije. Postojani su prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, za razliku od Cr-Ni austenitnih čelika, te su manje otporni na kloridne otopine (morska voda). Nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama, kao i atmosferske korozije



te oksidacije. Umjereno su postojani na pojavu jamičastog oštećenja ako sadrže Mo. Relativno niske cijene u usporedbi s ostalim nehrđajućim čelicima [2]. Standardni feritni čelici su niže legirani nego standardni austenitni i time pružaju slabiju zaštitu od korozije, prikladni su za upotrebu u unutarnjim prostorima gdje im je cijena održavanja niska i dug vijek trajanja [2].

### **2.3.1.1. Superferitni čelici**

Povišenjem čistoće sastava čelika pročišćavanjem u vakuumskim pećima i u elektronskom mlazu kao i sniženjem %C, povišenjem %Cr te legiranjem s Mo i Ni kao i Ti ili Nb, mogu se poboljšati neka od loših svojstava feritnih čelika. Na taj se način povisuje otpornost na kloridnu napetosnu koroziju i interkristalnu koroziju pri niskom temperaturama, te granica razvlačenja. Zbog tih svojstava i niže cijene mogu biti nadomjestak za skuplje austenitne čelike [2].

### **2.3.2. Austenitni nehrđajući čelici**

Najbolje i široko korištene vrste austenitnog nehrđajućeg čelika temelje se na 17-18 % kroma i 8-11 % dodataka nikla. Ova kombinacija elemenata za legiranje rezultira modifikacijom kristalne strukture željeza, u usporedbi s onom standardnom strukturom niskolegiranih čelika. Kao rezultat, ovi austenitni čelici pored njihovih otpornosti na koroziju imaju različite karakteristike formiranja i popustljivosti, kao i značajno bolju žilavost na širem rasponu temperatura. Njihova korozijska otpornost može biti pojačana sa dodavanjem molibdena [1]. Moderni austenitni čelici se lako proizvode s manjim udjelom ugljika tako da je pojava interkristalne korozije zbog kromovog karbida danas rijetka. Austenitni čelici nestabilizirani titanom imaju bolju završnu površinu nego oni stabilizirani titanom. Austenitni čelici su nemagnetični no u nekim slučajevima mogu postati slabo magnetični kao rezultat fazne transformacije u martenzit i ferit zbog na primjer zavarivanja [2]. Slika 2 prikazuje mikrostrukturu austenitnog čelika.



**Slika 2. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [4]**

Moguće je dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta koji djeluju stabilizirajuće kod opasnosti od interkristalne korozije. Povišen maseni udio dušika 0,2 % do 0,4 % djeluje naročito na povećanje čvrstoće i na otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju.

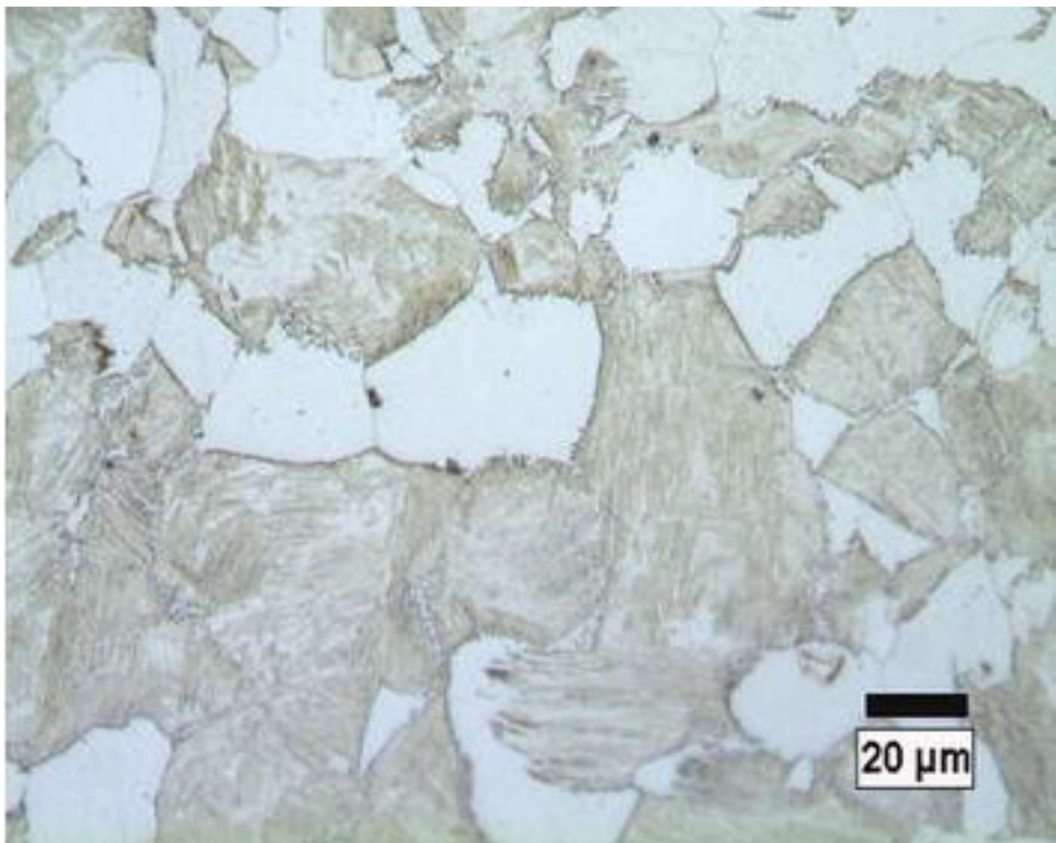
Austenitni čelici su dobro oblikovljivi u hladnom stanju, a hladnom deformacijom mogu očvrnuti. Uz dodatno legiranje Mo, W i V pokazuju dobru otpornost na puzanje pri temperaturama manjim od 600 °C. Otporni su na organske i anorganske kiseline, lužine i soli [2].

### **2.3.2.1. Visokolegirani austenitni čelici – superaustenitni**

Visokolegirani austenitni čelici razlikuju se od standardnih u otpornosti prema koroziji, a u nekim slučajevima i u mehaničkim i fizikalnim svojstvima. Razlog tomu su visoki udjeli kroma, nikla, molibdena i dušika. Dobro su zavarljivi i imaju odličnu deformabilnost [4].

### 2.3.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen maseni udio ugljika (0,15...1,0 %C) te u pravilu preko 13 % kroma. Moguće je legiranje i s molibdenom i niklom kako bi se povećala korozivna otpornost i čvrstoća materijala. Nikal također služi održavanju željene mikrostrukture, te sprječava višak slobodnog ferita kada se viši udjeli kroma koriste kako bi se povećala korozivna postojanost. Preveliki udio ovih elemenata ograničen je time što dovode do mikrostrukture koja nije potpuno martenzitna. Slika 3 prikazuje mikrostrukturu martenzita.



**Slika 3. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [5]**

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtijeva postupno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši udio ugljika i kroma to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozivne postojanosti).

Kod konstrukcijskih čelika u prvom je planu korozivna postojanost, a kod alatnih dodatno i otpornost na abrazivsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju često dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu čija je korozivna postojanost manja od čiste martenzitne

mikrostrukture. Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika ( $<0,30\%C$ ) od alatnih i popuštaju se pri višim temperaturama (poboljšavaju se). Moguće ih je toplinski obraditi i imaju BCT rešetku [2,3].

Ovi čelici imaju visoku čvrstoću, te otpornosti na trošenje, dobru kombinaciju čvrstoće i otpornosti koroziji. Najbolje ih je koristiti na komponentama pod velikim opterećenjima kao što je pumpa osovine, ventili vretena i specijalni zatvarači. Martenzitni čelici s manjim udjelom kroma imaju veći udio ugljika i slabiju otpornost koroziji [1].

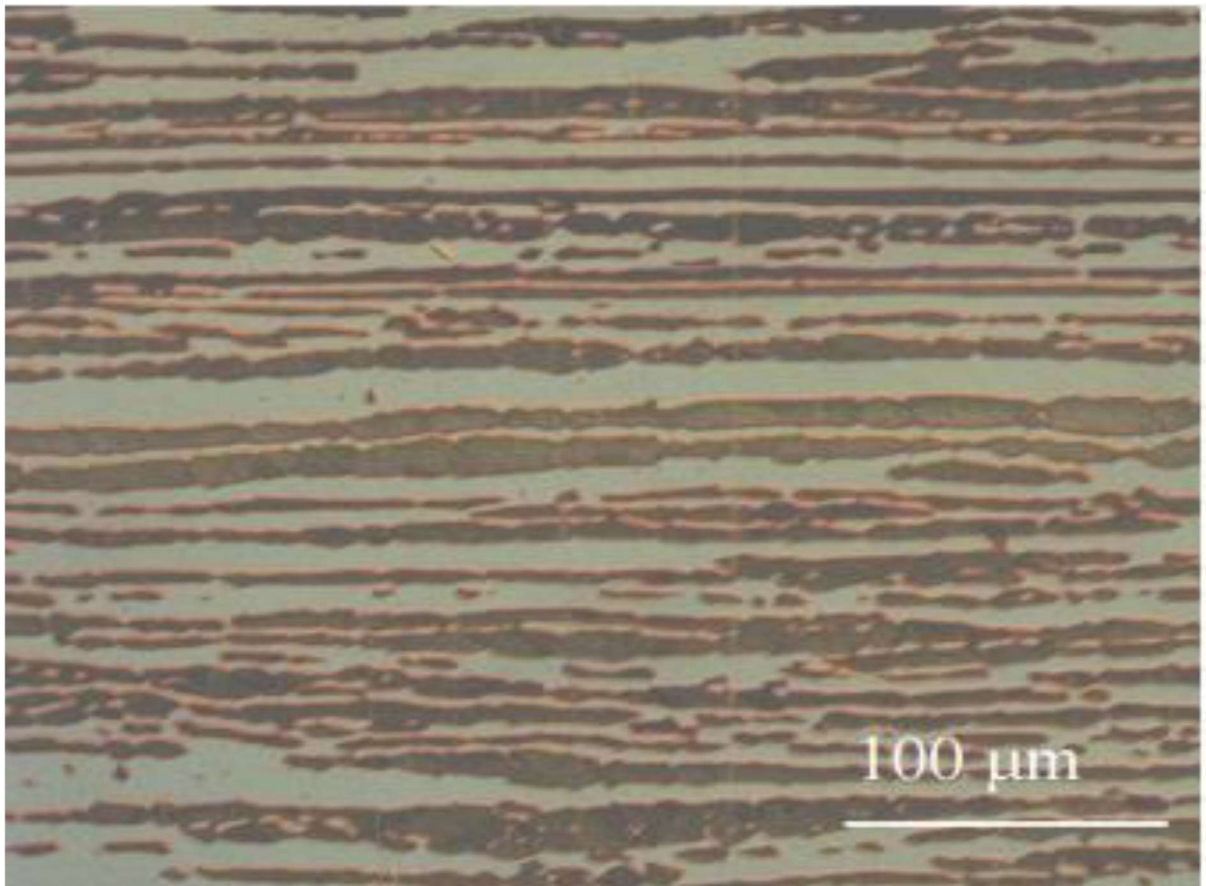
### **2.3.3.1. Mekomartenzitni čelici**

Radi se o niskougljičnim (manje od  $0,1\%C$  do realno  $0,03...0,05\%C$ ) martenzitnim čelicima kod kojih se smanjenje mehaničkih svojstava zbog sniženja masenog udjela ugljika nadomješta legiranjem s Cr (13 do 18%), Ni (1 do 6%) i Mo (manje do 3%). Po vrijednostima čvrstoće spadaju među visokočvrste čelike. Dobre su postojanost na opću koroziju, ali slabe na jamičastu koroziju [2].

### **2.3.4. Dupleks čelici**

Čelici iz ove skupine nemaju monofaznu mikrostrukturu nego dvofaznu austenitno-feritno strukturu sa 40-60 % ferita. Na taj se način odstupilo od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju ali je zato povećana otpornost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu te otpornost na sumporovodik. Vrlo je visoka postojanost na jamičastu koroziju. Dupleks čelici imaju dobru zavarljivost, iako dvofaznost čelika može izazvati teškoće pri zavarivanju zbog sklonosti krhkosti ferita i izlučivanja karbida po granicama zrna ferit/austenit [2,3].

Dupleks čelici kombiniraju mnoga dobra svojstva feritnih i austenitnih čelika. Zbog visokog udjela kroma i dušika, također često i molidbena ovi čelici pružaju dobru otpornost na lokalnu koroziju. Zbog svoje mikrostrukture dupleks čelici su visoke čvrstoće kao i otpornosti na pukotine izazvane napetosnom korozijom. Dupleks čelici su magnetični zbog svojeg udjela ferita. Slika 4 prikazuje mikrostrukturu dupleks nehrđajućih čelika.



**Slika 4. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [6]**

Dupleks čelici pružaju dobru kombinaciju od relativno visoke čvrstoće i dobre korozijske otpornosti. U vodi imaju dobru otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. Sve je šire područje primjene ovih čelika u industriji nafte i plina, papira, brodogradnji...[4,6].

#### **2.3.4.1. Super dupleks nehrđajući čelici**

Super dupleks nehrđajući čelici su kompleksniji i legiraniji od običnih dupleks čelika, pružaju visoku čvrstoću, dobru duktilnost i otpornost koroziji što ih čini prikladnim za upotrebu u zahtjevnim područjima, kao što su naftna, kemijska, petrokemijska i nuklearna industrija [6].

#### **2.3.5. Precipitacijski očvrsnuti čelici**

Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici su posebna skupina nehrđajućih čelika, njihovim razvojem se željelo ostvariti visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Osnovna karakteristika je povišena čvrstoća koja se postiže precipitacijskim očvrsnućem martenzitne ili austenitne matrice (koja se događa tijekom

vremena). Osim legiranih elemenata uobičajenih za nehrđajuće čelike, sadrže i elemente koji pri kontroliranoj toplinskoj obradi stvaraju različite spojeve (karbide, nitride, intermetalne spojeve), koji se u obliku sitnih čestica, precipitata, izlučuju u martenzitu ili austenitu. Najčešće se u tu svrhu dodaju bakar, aluminij, titan, niobij i molibden. Sitne i tvrde čestice precipitata otežavaju gibanje dislokacija i na taj način povisuju granicu razvlačenja, čvrstoću i tvrdoću. Veza između izlučene faze i krute otopine može biti koherentna, djelomično koherentna ili nekoherentna [3,4].

S obzirom na mikrostrukture prije precipitacije razlikuju se:

- Martenzitni;
- Poluaustenitni;
- Austenitni PH čelici.

#### **2.3.5.1. Martenzitni precipitacijski očvrsnuti čelici**

Martenzitni precipitacijski očvrsnuti čelici pored niskog udjela ugljika (oko 0,05 %), sadrže visoke udjele Cr (14 do 17 %) i Ni (4 do 6 %) dodatak Cu (oko 3 %), Mo i eventualno Nb (<0,4 %) i Al. Neki od ovih čelika po sastavu su slični mekomartenzitnim čelicima. Imaju visoku granicu razvlačenja i čvrstoću [3].

#### **2.3.5.2. Poluaustenitni precipitacijski očvrsnuti čelici**

Imaju sličan osnovni sastav kao martenzitni precipitacijski očvrsnuti čelici te neke od dodataka Mo, Ti, Al, V i N.

U gašenom stanju ovi čelici imaju austenitno feritnu mikrostrukturu koja je dobro obradiva odvajanjem čestica. Nakon gašenja austenit se destabilizira i pretvara u martenzit. Tako dobivena martenzitno-feritna mikrostruktura s eventualno malim udjelima zaostalog austenita, podvrgava se dozrijevanju na temperaturama od 480 do 600 °C [3].

#### **2.3.5.3. Austenitni precipitacijski očvrsnuti čelici**

Po sastavu su niskougljični i visokolegirani. Toplinska obrada se sastoji od rastvornog žarenja i dozrijevanja. Kako ovdje nema pretvorbe u martenzit, postiže se skromno očvrsnuće i to samo

precipitacijom faza tijekom dozrijevanja. Unatoč postojanju precipitata, austenitni čelici su visoko otporni na opću koroziju u ostarenom stanju, ali nisu postojani na napetosnu koroziju. Primjenjiv je i pri visokim radnim temperaturama u uvjetima vlačnog dugotrajnog opterećenja [3].

## 2.4. Mehanička i fizikalna svojstva nehrđajućih čelika

### 2.4.1. Mehanička svojstva nehrđajućih čelika

#### 2.4.1.2. Čvrstoća i istežljivost

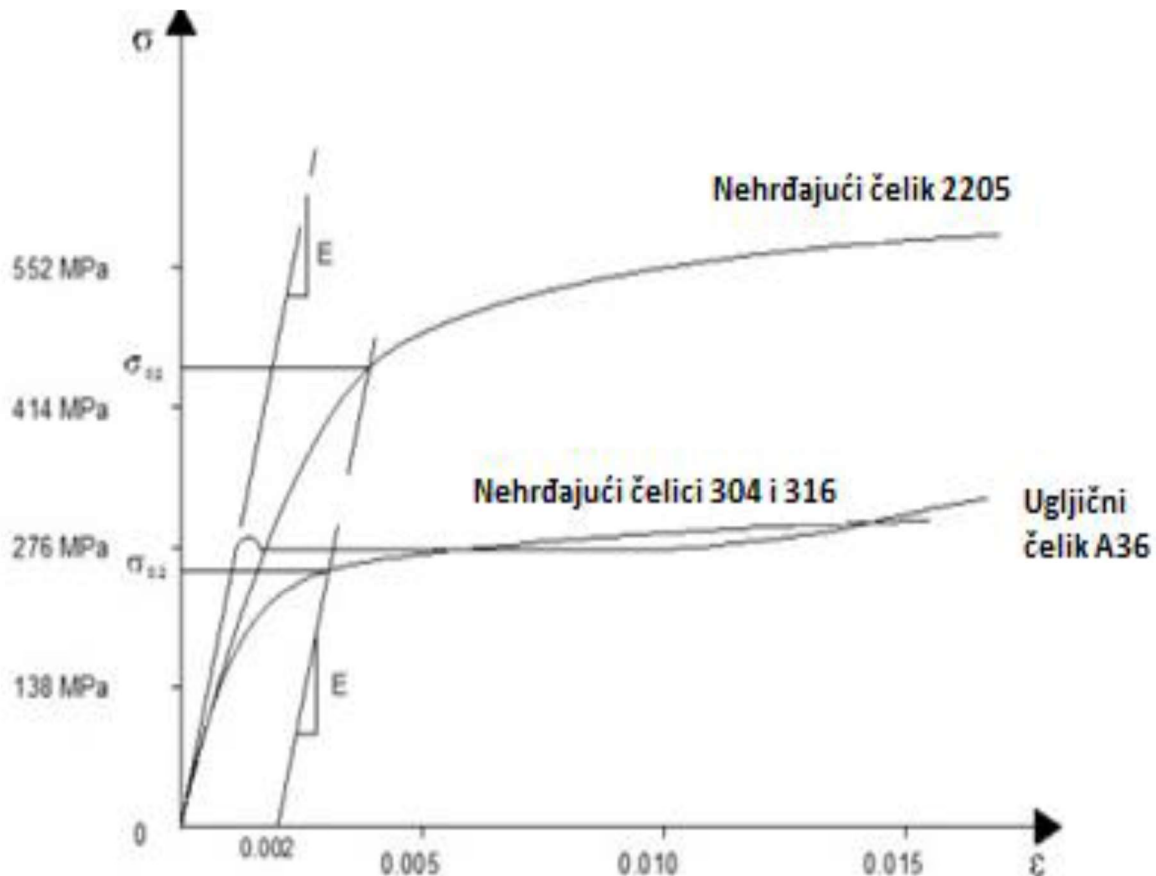
Mehanička svojstva od nekih široko korištenih nehrđajućih čelika su dana u tablici 1.

**Tablica 1. Mehanička svojstva nekih nehrđajućih čelika [7]**

Razred nehrđajućeg čelika	Vlačna čvrstoća (MPa)	Granica razvlačenja (MPa)	Produljenje (%)	Tvrdoća Rockwell B
AISI 304	579	290	55	80
AISI 316	579	290	50	79
S32205	760	520	27	-

Po normi BS EN 10088 granica razvlačenja je oko  $220 \text{ N/mm}^2$  za standardne austenitne nehrđajuće čelike. Ova čvrstoća se odnosi na materijale u prekaljenom stanju. U praksi te mjere mogu biti prekoračene ako se materijal obrađuje u hladnom stanju.

Martenzitni i percipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici mogu biti toplinski obrađeni tako da granica razvlačenja iznosi između  $650\text{-}1150 \text{ N/mm}^2$  [1]. Najvažnija razlika između niskolegiranih i nehrđajućih čelika je u obliku krivulje kod naprezanja. Niskolegirani čelici imaju linearnu krivulju za elastični dio dok nehrđajući čelici imaju zaobljenu krivulju s ne jasno definiranom granicom elastičnog istežanja. Slika 5 prikazuje dijagram naprezanja.



Slika 5. Dijagram naprezanja za različite čelike [8]

Zbog toga kod nehrđajućih čelika granica razvlačenja je uglavnom definirana preko dogovorene granice razvlačenja koja iznosi najčešće 0,2 % trajnog produljenja prvobitnog uzorka.

Nehrđajući čelici daju podosta različite i ne simetrične krivulje za tlačno i vlačno naprezanje. Za većinu nehrđajućih čelika krivulje naprezanja iskazuju veću ne linearnost za vlak nego za tlak. Nehrđajući čelici su anizotropni, pokazuju razlike u rezultatima kod naprezanja u različitim smjerovima. Na primjer kod čelika AISI 304L i AISI 316L transverzalna vlačna čvrstoća je manja nego longitudinalna, dok kod dupleks čelika S32205 transverzalna vlačna čvrstoća je veća nego longitudinalna (za otprilike 5 %) [8].

#### 2.4.2. Umor materijala

Otpornost na umor je važna kod postrojenja kao što su cjevovodi, nehrđajući čelici su ovdje proglašeni superiornima nad plastikom. Osnovne razlike između niskolegiranog čelika i nehrđajućih austenitnih čelika je u efektu očvrnuća u radu, to očvrnuće se može pojaviti u ranim fazama opterećenja i može biti važno kod malih ciklusa. Kod velikih ciklusa umora



materijala austenitni nehrđajući čelici u usporedbi s ne željeznim metalima i legurama slične kristalne strukture ne pokazuju veću dinamičku izdržljivost

Kod usporedbe niskolegiranih čelika sa nehrđajućim čelicima na umor pri velikom broju ciklusa dolazimo do rezultata da je za austenitne nehrđajuće čelike raspon izdržljivosti manji nego kod niskolegiranih čelika a za dupleks nehrđajuće čelike je raspon izdržljivosti veći nego kod prijašnja dva. Ovi rezultati nam pokazuju da su dupleks čelici u prednosti u pogledu otpornosti na umor materijala.

Međutim izdržljivost na umor materijala je manja u medijima s prisutnosti klorida kao i okolišu PH vrijednosti manje od 4. Kao i kod niskolegiranih čelika tako i kod nehrđajućih čelika rješavanje površinske napetosti može rezultirati povećanom dinamičkom izdržljivošću materijala [1,8].

### 2.4.3. Fizikalna svojstva

U usporedbi sa niskolegiranim čelicima austenitni nehrđajući čelici imaju 30-50 % veću toplinsku istezljivost i 30 % manju toplinsku vodljivost. Austenitni nehrđajući čelici su obično ne magnetični dok feritni, martenzitni i dupleks čelici su magnetični [1].

Neka fizikalna svojstva nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi su dana u tablici 2.

**Tablica 2. Fizikalna svojstva nehrđajućih čelika [8]**

Razred nehrđajućeg čelika	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Toplinska istezljivost 20-100 °C (10 <sup>-6</sup> /°C)	Toplinska provodnost (w/m°C)	Toplinski kapacitet (J/kg°C)
AISI 304	7900	17	15	500
AISI 316	8000	16,5	13,5	500
S32205	7850	13	20	450

## 3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. [9]

Trošenje je reakcija materijala na vanjski podražaj i može biti mehaničke i/ili kemijske prirode.

Trošenje je neželjena pojava i utjecaj trošenja na pouzdanost industrijskih komponenti se intenzivno proučava. Značajniji naponi uloženi u ispitivanje trošenja su učinjeni 1960-ih godina u industrijski razvijenim zemljama. Izravni troškovi kvarova zbog trošenja, zamjene dijelova, povećanja opsega posla, smanjene produktivnosti, povećane potrošnje energije i štetnosti za okoliš su svakodnevni problemi u industriji. U nekim ekstremnim slučajevima kvarova moguće su i ljudske žrtve.

Postoje četiri osnovna mehanizma trošenja:

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija

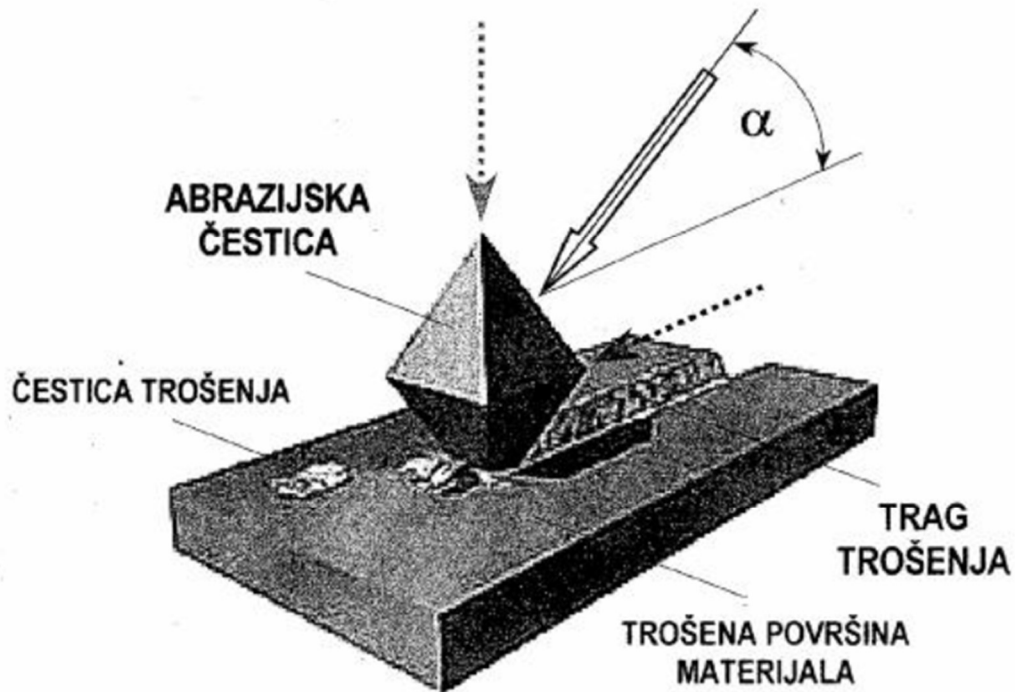
### 3.1. Abrazija

Abrazija je mehanizam trošenja materijala, gdje uslijed djelovanja tvrdih čestica ili tvrdih izbočina dolazi do istiskivanja materijala. Ovaj mehanizam trošenja je najučestaliji u industriji. Abrazivna sredstva mogu biti: kamen, ugljen, cement, keramika i sl. Pošto su abrazivi uglavnom mineralnog podrijetla, često se abrazija zove i mineralno trošenje.

#### 3.1.1. Teorijska abrazija

Teorijski, abrazija se može prikazati kao proces mikrorezanja između pravilne četverostrane piramide i ravne površine. U tom slučaju materijal četverostrane piramide je veće tvrdoće od

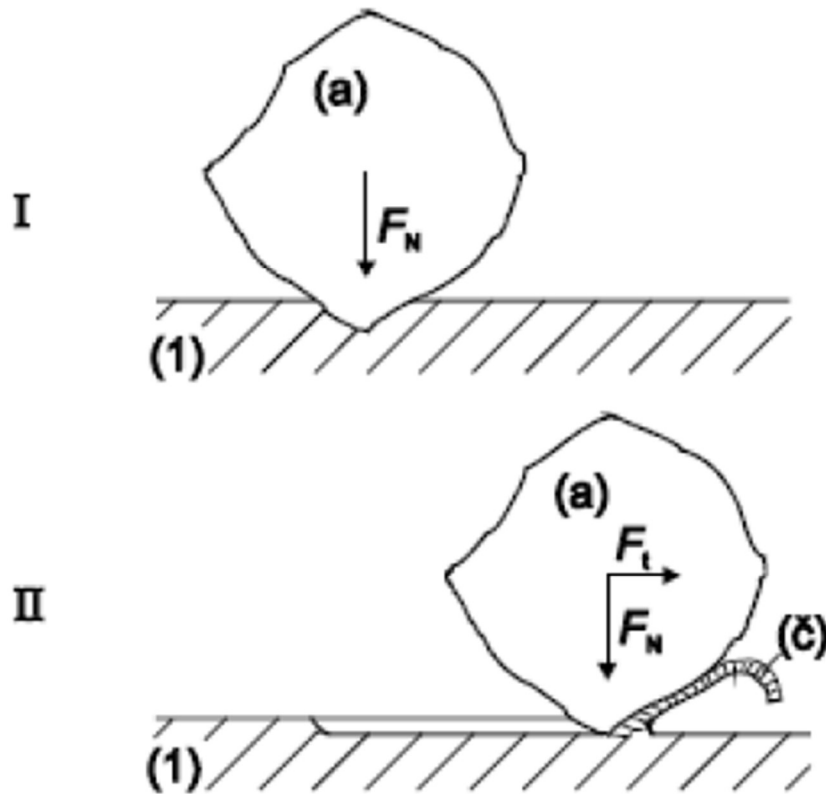
materijala ravne površine, piramida djeluje na ravnu površinu silom pod kutom  $\alpha$  te uslijed toga i geometrije piramide dolazi do mikrorezanja, odvajanja čestica trošenja i pojave traga trošenja.



Slika 6. Teorijski model abrazije [10]

### 3.1.2. Realna abrazija

Pošto se mehanizmi trošenja prikazuju jediničnim događajima, abrazija se može prikazati kao proces mikrorezanja u dvije faze jediničnog događaja, slika 2.



Slika 7. Jedinični događaj abrazije [9]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze: I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ . II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ . [9]

### 3.1.3. Otpornost na abraziju

Najutjecajniji čimbenik za otpornost na abraziju je omjer tvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Ostali utjecajni čimbenici se mogu pronaći u literaturi, a to su najčešće odnosi između najbitnijih svojstva materijala: tvrdoća materijala, mikrostruktura, udio i vrsta karbida, veličina zrna karbida, i ostali utjecajni čimbenici.

Ukoliko nije moguće eliminirati mjere za smanjivanje abrazivnog trošenja u kliznom

dodiru su izbor odgovarajućeg materijala, odnosno primjena postupaka zaštite površine. [9]

### 3.1.4. Popis osnovnih metoda

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje postoji velik broj uređaja i metoda:

1. Metoda “suhi pijesak/ gumeni kotač“ (“dry sand/ rubber wheel“) - metoda će biti detaljno opisana u nastavku završnog rada.
2. Metoda “ suhi pijesak/mokri gumeni kotač“ – princip rada je kao i u gore navedenoj metodi osim što se gumeni kotač može i ne mora zalijevati tekućinom
3. Metoda ispitivanja otpornosti plastike i organskih prevlaka na abraziju prema normi ASTM D1044
4. Metoda ispitivanja “wet abrasion scrub tester“ prema normi ASTM D2486 kojom se ispituju otpornost na abraziju keramika, organskih prevlaka nastalih uslijed njihova čišćenja različitim četkama, spužvama ili drugim abrazivnim sredstvima
5. Metoda ispitivanja na abraziju prema normi ASTM B611, koja je jako slična metodi “suhi pijesak/ mokri kotač“ osim što se kod nje kotač nalazi u posudi ispunjenoj vodom i aluminijskim oksidom. Metoda se koristi za ispitivanje na abraziju tvrdih metala, keramika, metala sa otvrdnutom površinom, ojačanih čelika i sl..

Osim navedenih eksperimentalnih metoda otpornost na abraziju se može određivati i tablično, prema Indeksu otpornosti na abraziju Rab. Ovaj model u obzir uzima tvrdoće prema Vickers-u pojedinih konstituanata abraziva i ispitivanog materijala te se iz tablica određuje Indeks otpornosti na abraziju Rab, čija veća vrijednost daje veću otpornost na abraziju. [9]

## 4. METODA “SUHI PIJESAK/ GUMENI KOTAČ”

### 4.1. Opis metode “suhi pijesak/ gumeni kotač”

Metoda “suhi pijesak/ gumeni kotač” engl. “dry sand/ rubber wheel” određuje otpornost pojedinih materijala na abraziju, ako je glavni oblik trošenja materijala abrazija. Sama metoda se sastoji od abradiranja površine ispitivanog uzorka pijeskom određene veličine zrna i pod određenim pritiskom na samom mjestu dodira epruvete i gumenog kotača. Svrha i prednost ove metode je da se ispitivanje provodi u točno određenim uvjetima pa su rezultati dobiveni ovom metodom univerzalni i međusobno usporedivi. Svi parametri i oblik samog uređaja za provedbu pokusa se određuju prema metodi ASTM G65.

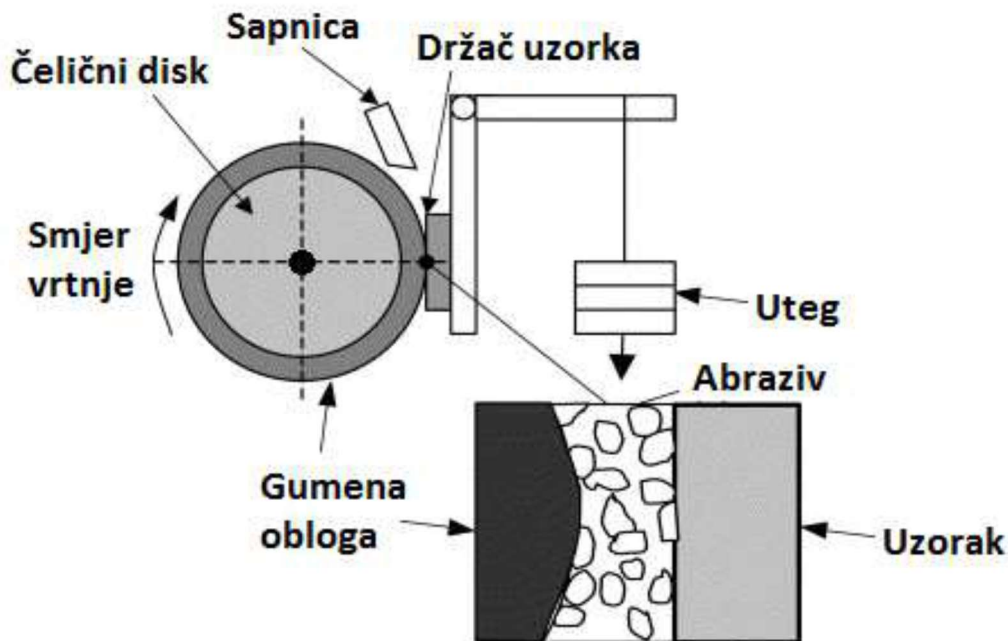
Za precizno dobivanje rezultata ispitni uzorak se važe na analitičkoj vagi prije i poslije provođenja pokusa, te se bilježi gubitak mase uzrokovan abrazijom. Rezultati se također mogu iskazivati i kao gubitak volumena u  $\text{mm}^3$ . Ovakav način prikaza rezultata pogodan je kod materijala kod kojih je osjetna razlika u gustoći ispitivanih materijala. [11]



**Slika 8. Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" (Laboratorij za tribologiju FSB-a)**

## 4.2. Uređaj za provedbu metode “suhi pijesak/ gumeni kotač“

Na slici 9. je prikazan klasična konstrukcija uređaja za provedbu metode “suhi pijesak/gumeni kotač“.



Slika 9. Shematski prikaz uređaja za test “suhi pijesak/ gumeni kotač“ [12]

### 4.2.1. Gumeni kotač

Gumeni kotač se sastoji od kotača obloženog gumom čija tvrdoća iznosi oko 60 Shore A, dopušta se vrijednost od 58-62 Shore A. Mjerenje tvrdoće se mora provesti na najmanje četiri mjesta na gumenom kotaču, tj. pod kutom od 90° na vanjskom polumjeru kotača. [11]

### 4.2.2. Abraziv

Abraziv koji se koristi u metodi je zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70. Udio vlage u pijesku ne smije prelaziti 0,5 % masenog udjela, jer bi u suprotnom došlo da pogrešnih konačnih vrijednosti testa. Ako se u pijesku nalazi veći udio vlage od dopuštenog, pijesak treba zagrijati na temperaturu od 100 °C i na toj temperaturi ga držati minimalno 1h. Ako je i nakon toga udio vlage prevelik postupak treba ponoviti. Ako se pijesak nalazi u prostoriji sa

puno vlage onda ga treba skladištiti u posebnim prostorijama sa konstantnom temperaturom i količinom vlage, zatvorenim kutijama sa žaruljom, ili u pećima za sušenje elektroda za zavarivanje. Višestruka upotreba pijeska može utjecati na rezultate i zato se ne preporučuje. Veličina zrna ima utjecaja na veličinu trošenja u slučaju kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće materijala koji se troši. Kod vrlo sitnih abrazivnih čestica (prašina) trošenje je vrlo veliko. Kod većih zrnaca trošenje naglo pada da bi se daljnjim povećanjem zrna ponovno počelo rasti do određene veličine zrna nakon čega veličina zrna uglavnom ne utječe na trošenje. Kod abraziva koji su mekši od materijala koji se troši, veličina čestica abraziva nema skoro nikakvog utjecaja na veličinu trošenja.

Oblik zrna abraziva je od velikog značenja jer se abrazivna zrna mogu smatrati kao manje ili više oštri noževi. Nepravilno uglati oblik zrna odnosi više osnovnog materijala nego zaobljeni oblik.

Količina abraziva djeluje kod raznih osnovnih materijala različito u ovisnosti o adheziji između abraziva i materijala koji se troši. Kod nekih materijala trošenje raste sa količinom abraziva, a kod nekih uglavnom ostaje isto ili čak kod određenih količina opada. [11]

#### **4.2.3. Mlaznica za pijesak**

Mlaznica treba biti oblikovana tako da daje točan protok pijeska i pravilno istjecanje pijeska kako je potrebno za ispravno ispitivanje. Duljina mlaznice može biti bilo koja pod uvjetom da omogućuje povezivanje sa lijevkom za pijesak preko plastičnog crijeva. Za vrijeme rada, otvor mlaznice treba biti toliko blizu dodirne površine ispitnog uzorka i gumenog kotača koliko je to konstrukcijski moguće.

Za izradu mlaznice preporuča se upotreba šavne ili bešavne cijevi od nehrđajućeg čelika kako bi se omogućilo lakše zavarivanje i otpornost na koroziju. Također se uspješno koristi i cijev od čelika ili bakra. Istjecanje treba biti laminarno, a oblik struje iz mlaznice uzak. Pijesak treba prolaziti između ispitnog uzorka i gumenog kotača.

Protok abraziva kod novijih mlaznica podešava se veličinom otvora sapnice te iznosi 250 do 350 g/min. [11].



#### 4.2.4. Pogonski motor

Kotač je pogonjen elektromotorom nominalne snage 0,7 kW (1 KS) preko zupčastog prijenosnika prijenosnog omjera 1/10. Ovakav prijenosni omjer osigurava konstantan moment prilikom opterećenja. Brzina okretanja je približno 200 o/min  $\pm 10$  okretaja te mora biti konstantna pod opterećenjem.

Pogon mora biti opremljen sa brojačem okretaja motora koji osigurava broj okretaja potreban za pojedinu varijantu postupka ispitivanja. Nakon zadanog broja okretaja kotača uređaj mora omogućiti automatsko isključivanje pogona uređaja. [11]

#### 4.3. Ultrazvučni uređaj za čišćenje uzoraka

Uzorke smo nakon određenog ciklosa trošenja ultrazvučno čistili u intervalima od 90 sekundi. Ultrazvučni čistač je uređaj koji koristi ultrazvuk (najčešće od 20-400 kHz) i odgovarajuću tekućinu (ponekad i običnu vodu) za čišćenje predmeta. Ultrazvuk može biti primijenjen u kombinaciji sa vodom, a ponekad i sa odgovarajućom otopinom koja poboljšava čišćenje. Ultrazvučni čistači (ultrazvučne kadice) koriste se za čišćenje različitih vrsta predmeta uključujući nakit, objektivne i različite optičke djelove, satove, zubne i kirurške instrumente, alate, kovanice, naličpera, palice za golf, vatreno oružje, muzičke instrumente, industrijske elemente i elektroničku opremu. Korišteni su u mnogim zlatarnama, u proizvodnji satova i elektroničkim servisima. Takvi čistači su se počeli primjenjivati u industriji 50-ih godina prošlog stoljeća, a u 70-ima su primjenu našli i u domaćinstvima[13].

##### 4.3.1. Karakteristike procesa

Ultrazvučno čišćenje koristi kavitacione mjehuriće, proizvedene pomoću visoko frekventnih tlačnih (zvučnih) valova usmjerenih u tekućinu. Proces mućkanja stvara velike sile koje skidaju prljavštinu i nečistoće sa materijala kao što su metali, plastike, stakla, gume i keramika. Te sile također prodiru i u rupe, pukotine i u udubljenja. Namjera je temeljito uklanjanje svih tragova onečišćenja čvrsto pripijenih ili nastalih na čvrstim površinama. U nečistoće se ubrajaju prašina, zemlja, ulja, pigmenti, hrđa, maziva, alge, gljivice, bakterije, vodeni kamenac, otisci prstiju, vosak, čađa, plijesan, biološki tragovi poput krvi itd. Ultrazvučno čišćenje se može primijeniti

na različite oblike, veličine i materijale i nije nužno da se onečišćeni dio rastavlja zbog čišćenja. Dio koji se podvrgne takvom čišćenju ne smije biti sasvim na dnu, jer se onda taj dio površine, koji nije u dodiru sa vodom ne očisti [13].

#### 4.3.2.Princip rada

U ultrazvučnoj kadici, predmet koji se čisti je umetnut u spremnik koji sadrži vodu ili odgovarajuću otopinu (vodu ili organsku otopinu, ovisno o predmetu). U vodenim kadama, dodaje se detergent koji razbija površinske napetosti vodene baze. Ultrazvučni davač, sonda, koja je ugrađena u komoru ili je spuštена u tekućinu, proizvodi ultrazvučne valove u fluidu promjenom veličine električnog signala koji oscilira na ultrazvučnoj frekvenciji. To stvara tlačne valove u tekućini spremnika, koji dovode do stvaranja više miliona mikroskopskih „praznina“ ili „parcijalne vakuumske mjehure“ (kavitaciju). Ti mjehuri se, kako je već objašnjeno ranije, uruše (implodiraju) uz veliku energiju; vrijednosti temperatura i tlakova dostižu 5000 K i 1300 bara. Međutim, ti mjehuri su toliko mali da uzrokuju čišćenje i uklanjanje površinskih prljavština i naslaga. Što je viša frekvencija, to je manji razmak između kavitacijskih točaka, što čišćenje čini temeljitijim. Otopina za čišćenje sadrži sastojke namijenjene povećanju efektivnosti čišćenja. Npr. smanjivanje površinske napetosti povećava razine kavitacije. Točan sastav otopine ovisi o elementu koji se čisti. Otopine su najčešće zagrijavane na oko 50-65 °C , međutim, u medicinskim primjenama čišćenje bi trebalo biti na temperaturi do 38 °C [13].



Slika 10. Ultrazvučni uređaj za čišćenje uzorka

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1 OTPORNOST NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

Ispitivanje abrazija provedeno je metodom “suhi pijesak/ gumeni kotač“ (“dry sand/ rubber wheel“) koja je prethodno opisana.

Ispitivano je 6 uzoraka, od toga 3 od materijala AISI 304 (A2) te 3 od materijala AISI 316 (A4).

Ispitivanje je provedeno tako da su uzorci stavljeni jedan po jedan u držač uzorka koji je prihvaćao uzorak i držao ga nepomičnim. Nakon toga držač uzorka se primicao čeličnom disku koji je imao gumenu oblogu te je provjeravano dolazi li do ravnomjernog protoka pijeska.

Ukoliko protok pijeska nije bio ravnomjeren moralo se rastaviti dovod i očistiti. Nakon toga bi se zatvarao poklopac na kojem je bio brojač okretaja kotača te bi trošenje počelo prilikom paljenja stroja.

**Tablica 3. Rezultati mjerenja mase uzoraka prilikom abrazijskog trošenja**

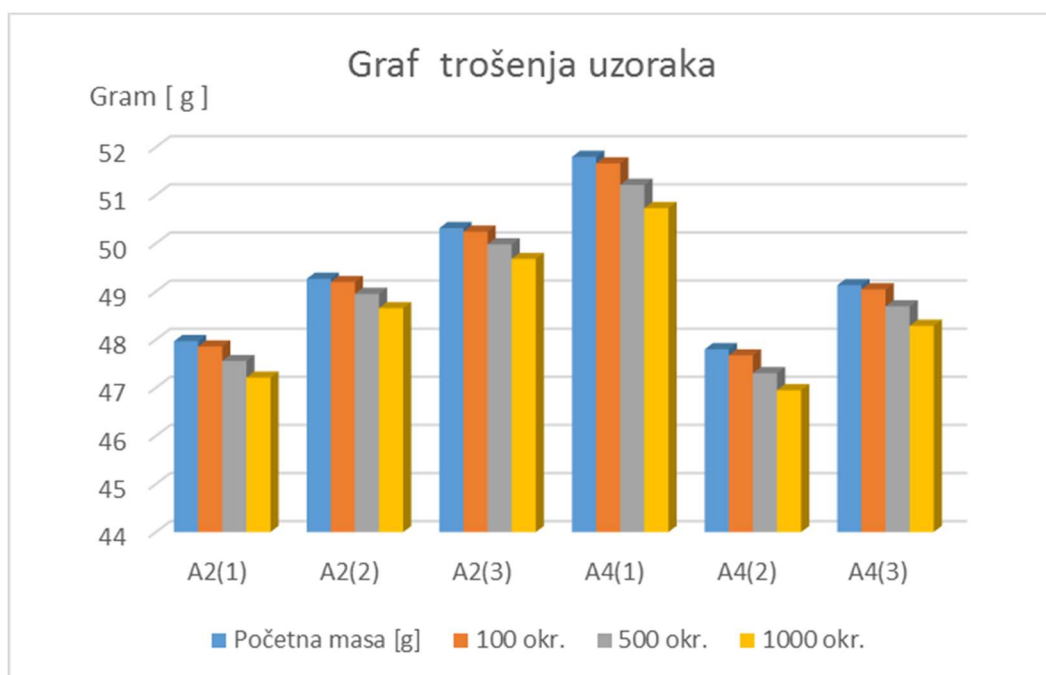
	Početna masa [g]	100 okr.	500 okr.	1000 okr.
A2(1)	47,967	47,8544	47,5535	47,2097
A2(2)	49,263	49,1945	48,9485	48,6511
A2(3)	50,3161	50,2411	49,978	49,6742
A4(1)	51,7964	51,6593	51,2141	50,7311
A4(2)	47,7987	47,6703	47,3003	46,9458
A4(3)	49,1303	49,0414	48,6904	48,2852

Ispitivanje je zaustavljano nakon 100, 500 i 1000 okretaja „gumenog kotača“ te se uzorak ispirao u vodi. Nakon ispiranja u vodi uzorak je osušen i stavljen u ultrazvučni uređaj u kojem se čistio u vremenu od 90 sekundi. Nakon svakoga čišćenja slijedilo je vaganje na visokopreciznoj vagi Metler B5C 1000 koja ima osjetljivost na 4 decimale.



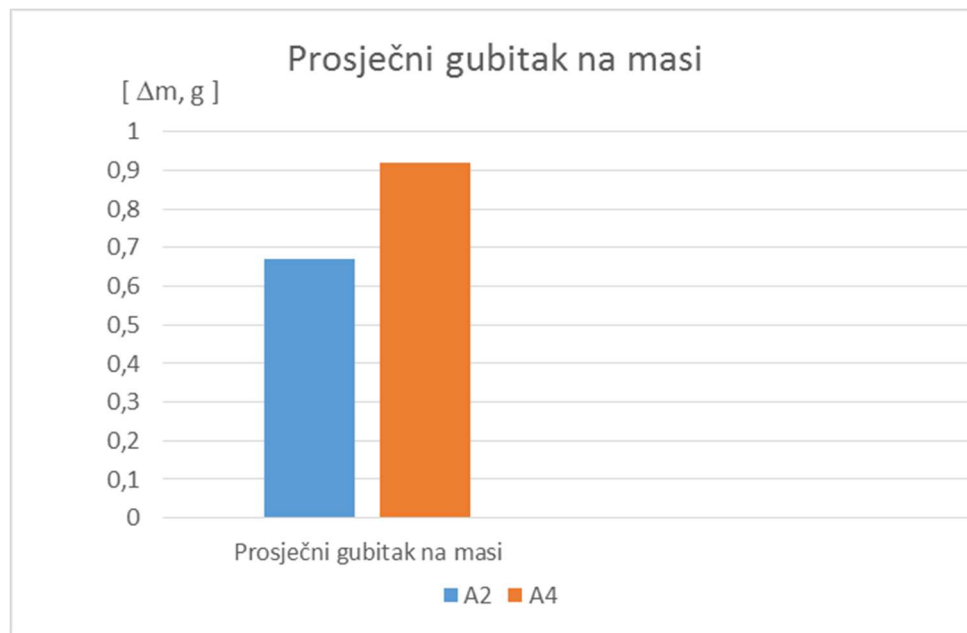
Slika 11. Vaga Metler B5C 1000 [4]

Dobiveni rezultati se bolje vide prikazani grafički na slici 12. Na njoj vidimo da se veći gubitak mase postiže kod materijala AISI 316 (A4). Iako razlike nisu osjetno velike.



Slika 12. Prikaz trošenja uzoraka

Prosječni gubitak na masi materijala AISI 304 (A2) iznosi 0,6704 grama nakon 1000 okretaja „gumenog kotača“, dok gubitaka na masi materijala AISI 316 (A4) iznosi 0,9211 grama nakon 1000 okretaja „gumenog kotača“.

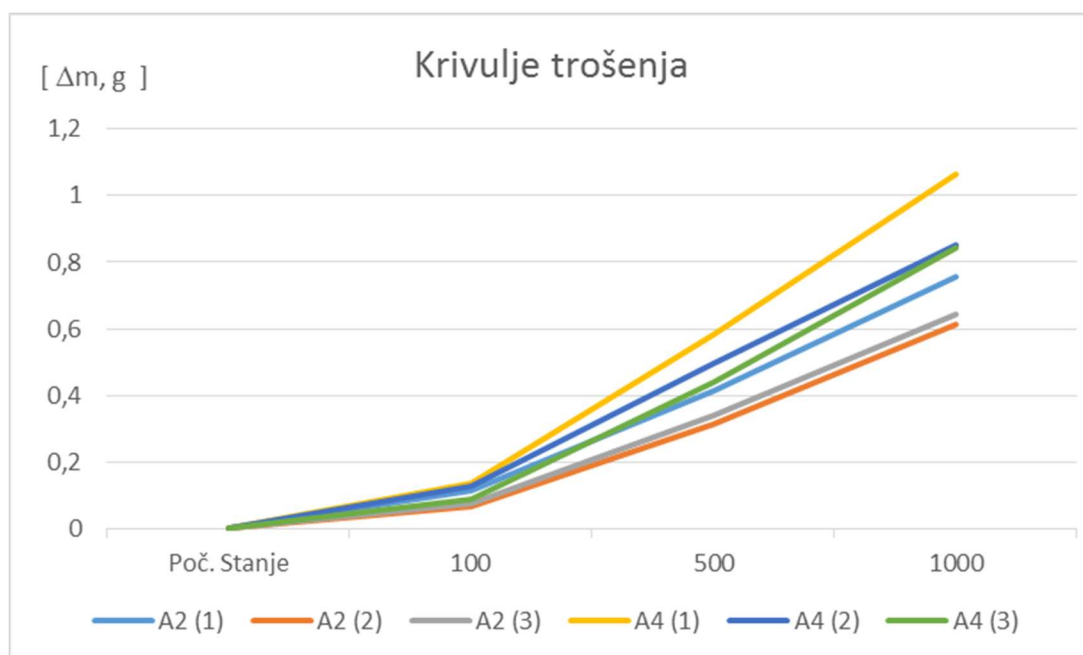


**Slika 13. Prosječni gubitak mase uzorka nakon 1000 okretaja**

Primijeti se da dolazi do relativno velikog trošenja materijala kao što je i očekivano zbog toga što je ovo čelik kojem je primarno svojstvo otpornost na koroziju. Trag trošenja je prikazan na slici 12. ispod.



Slika 14. Trag trošenja materijala

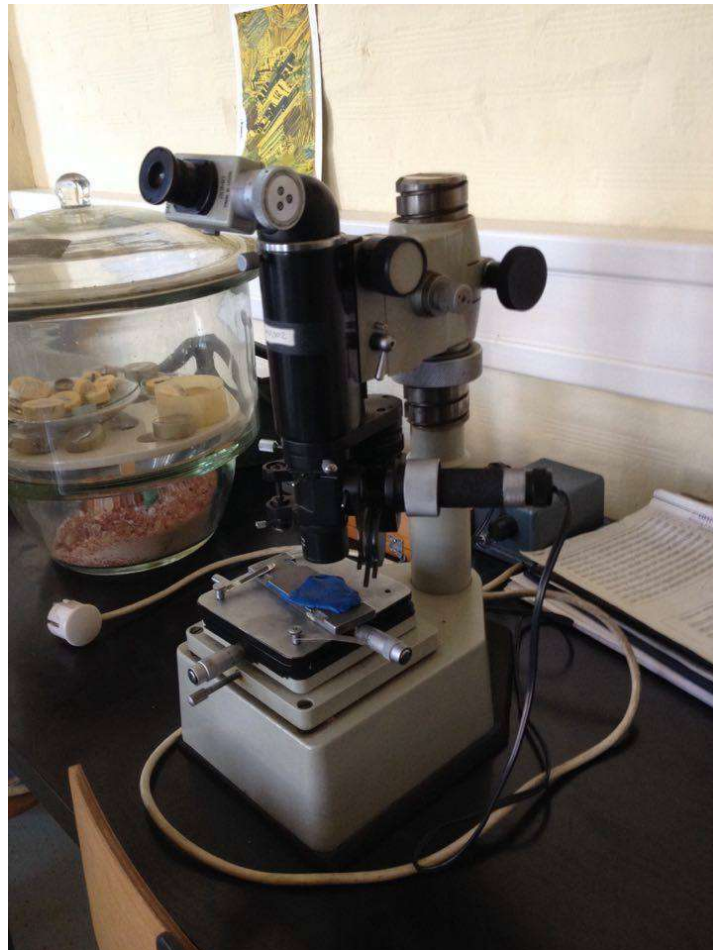


Slika 15. Krivulje trošenja materijala

Krivulje trošenja nam pokazuju tendenciju gubitka materijala. Vidljivo je da materijal AISI 316 (A2) ima veći porast gubitka.

## 5.2. TVRDOĆA

Mjerenje tvrdoće se provodilo po metodi Vickers. Kao opterećenje se koristio uteg od 200 grama.



**Slika 16. Tvrdomjer sa dijamantnom prizmom**

Tvrdoću je mjerena na 3 mjesta na svakom materijalu te su dobiveni rezultati prikazani u tablici 4. Očigledno je da veća tvrdoća sa sobom povlači i veću otpornost na abrazijsko trošenje. Tako je dobiveno da materijal AISI 304 (A2) ima veću tvrdoću.

**Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće na 3 različita mjesta na materijalu**

	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
A2	244 HV0,2	188 HV0,2	217 HV0,2
A4	150 HV0,2	139 HV0,2	155 HV0,2

Prosječna tvrdoća za materijal AISI 304 (A2) iznosi 216 HV0,2, dok prosječna tvrdoća za materijal AISI 316 (A4) iznosi 148 HV0,2

**Tablica 5. Prosječna tvrdoća**

	Prosječna tvrdoća
A2	216 HV0,2
A4	148 HV0,2

## 5.3. MIKROSTRUKTURA

Promatrane su mikrostrukture pri različitim povećanjima. Povećanja pod kojima su se uspoređivali materijali su 100x, 200x, 500x i 1000x.





**Slika 17. Pripremljen uzorak za analizu**

Pripremljeni uzorci se čuvaju u eksikatoru. Eksikator je vrsta okrugle posude koja služi za čuvanje i zaštitu uzoraka. Korišteni eksikator je imao silika-gel zrna u podnožju za zaštitu od vlage. Kao zaštita često se koriste bezvodni kalcijev klorid, koncentrirana sumporna kiselina itd.



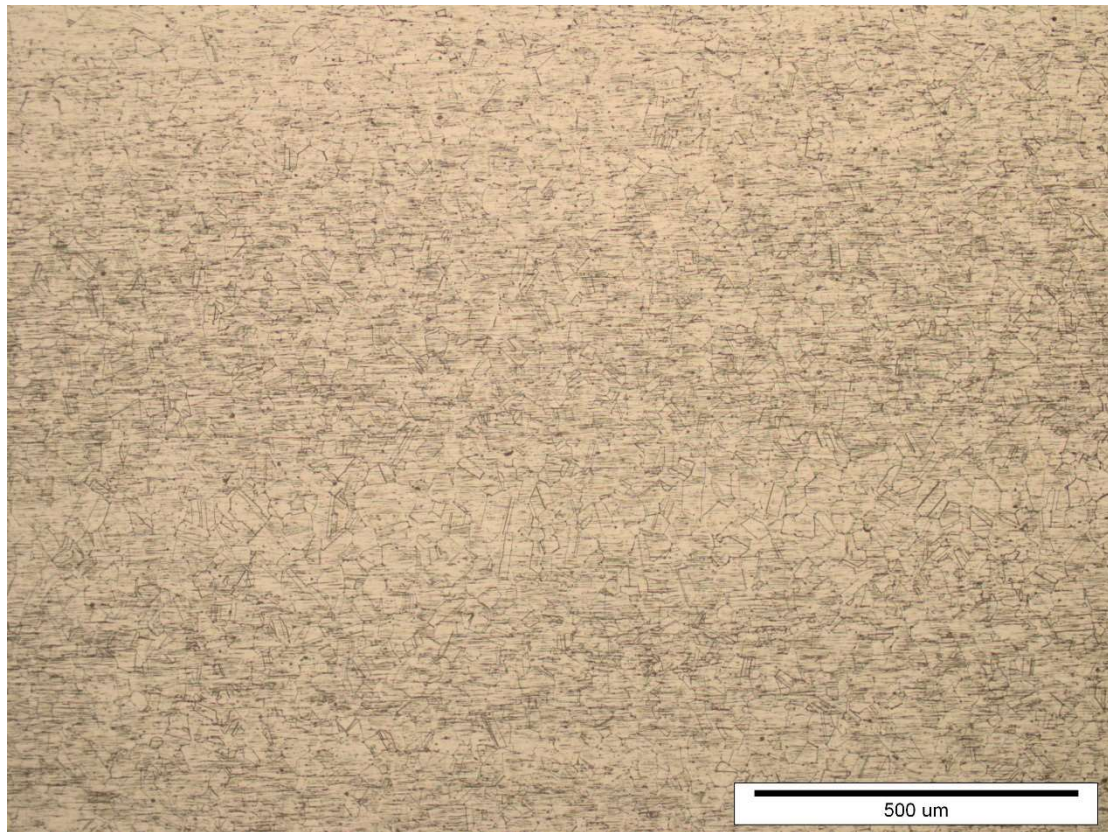
**Slika 18. Eksikator sa silika-gel zrnima**

Gledanje mikrostrukture je rađeno na svjetlosnom mikroskopu marke OLYMPUS GX51. Kod svjetlosnog mikroskopa, snop svjetlosti osvjetljava uzorak koji promatramo te zatim prolazi kroz optički sustav koji omogućava stvaranje povećane slike uzorka. Optički sustav svjetlosnog mikroskopa sastoji se od niza leća koje su zadužene za usmjeravanje svjetlosti.

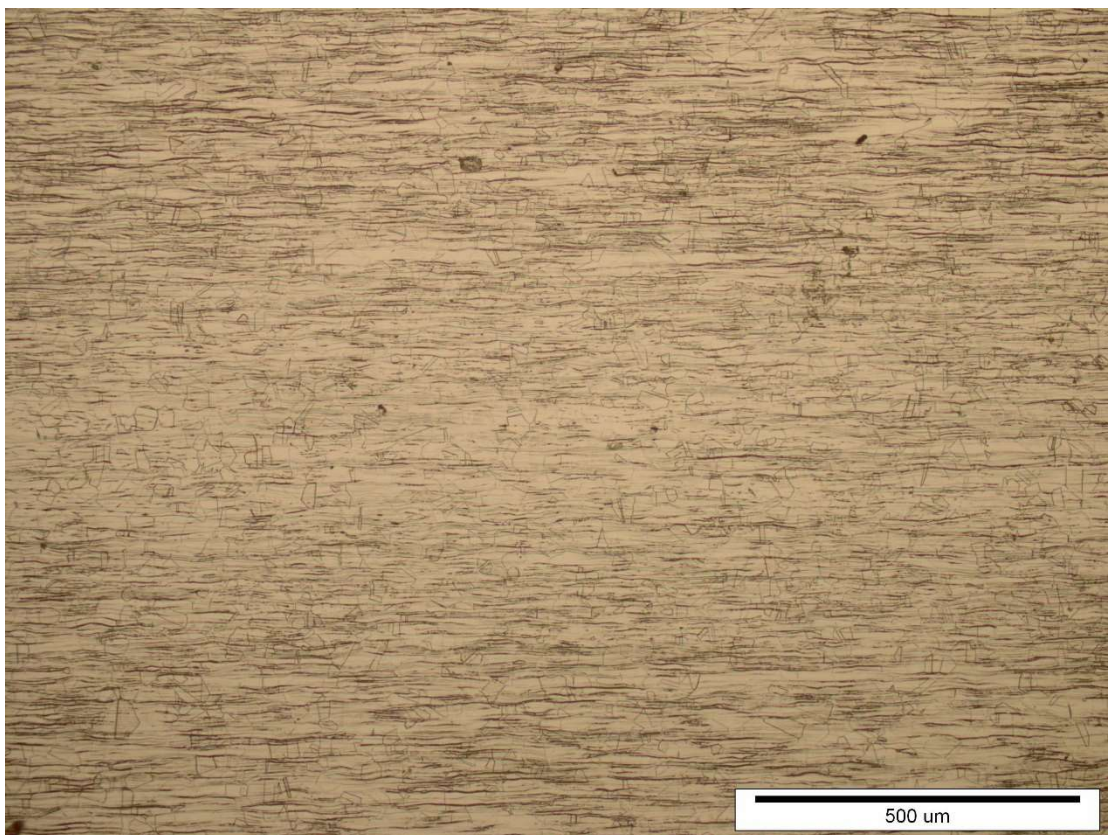


**Slika 19. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51**

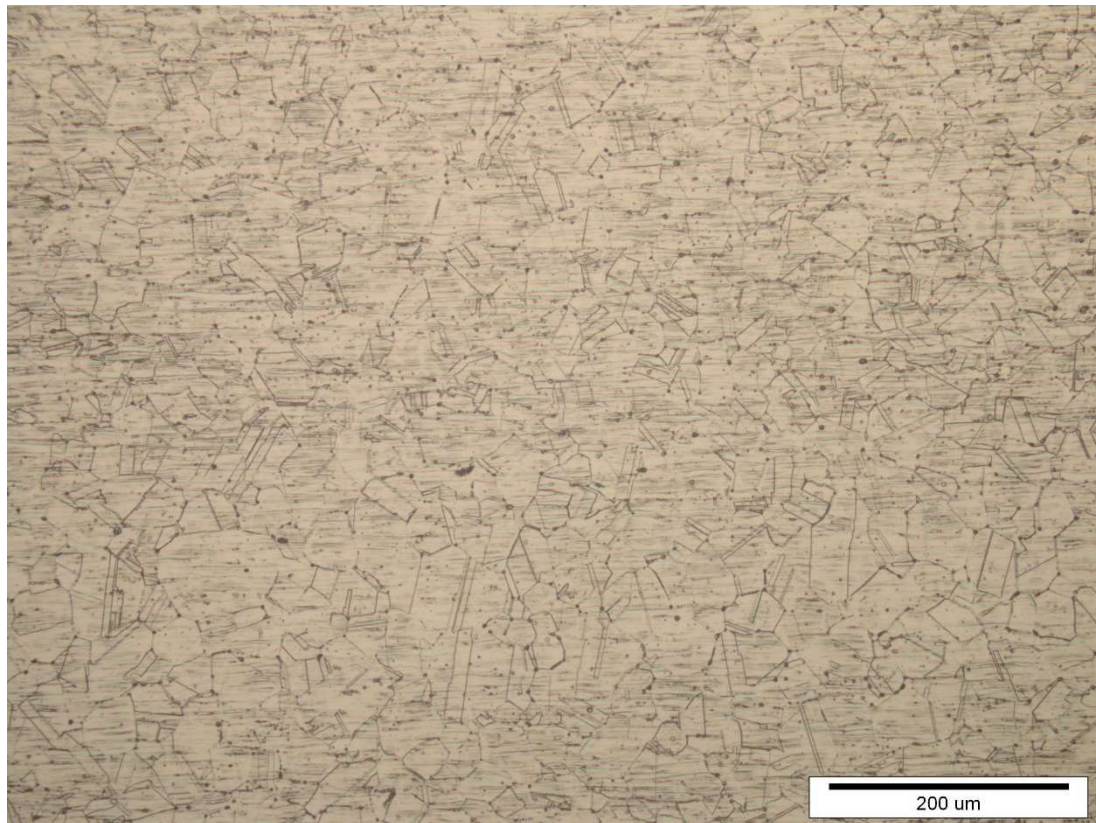
Svjetlost kojom se osvjetljava predmet prolazi kroz tzv. kondenzor koji može biti građen od jedne ili više leća, a njegova je uloga da sabire zrake svjetlosti na uzorku koji promatramo kako bi on bio što bolje osvjetljen. Potom svjetlost prolazi kroz uzorak i ulazi u leće objektivna koje stvaraju prvu povećanu sliku predmeta. Suvremeni svjetlosni mikroskopi omogućuju razlučivanje predmeta koji su međusobno udaljeni  $0.2\mu\text{m}$ , te postižu povećanje do 3000 puta.



**Slika 20. AISI 304 (A2) povećanje 100x**



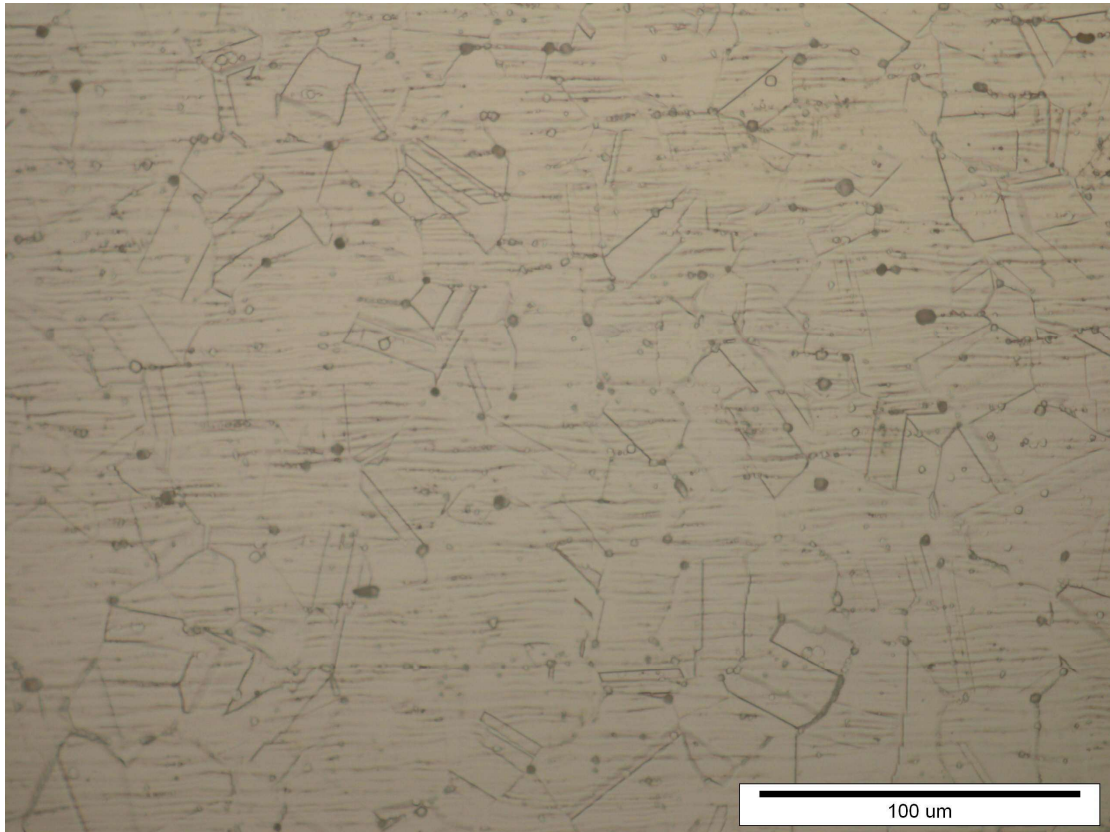
**Slika 21. AISI 316 (A4) povećanje 100x**



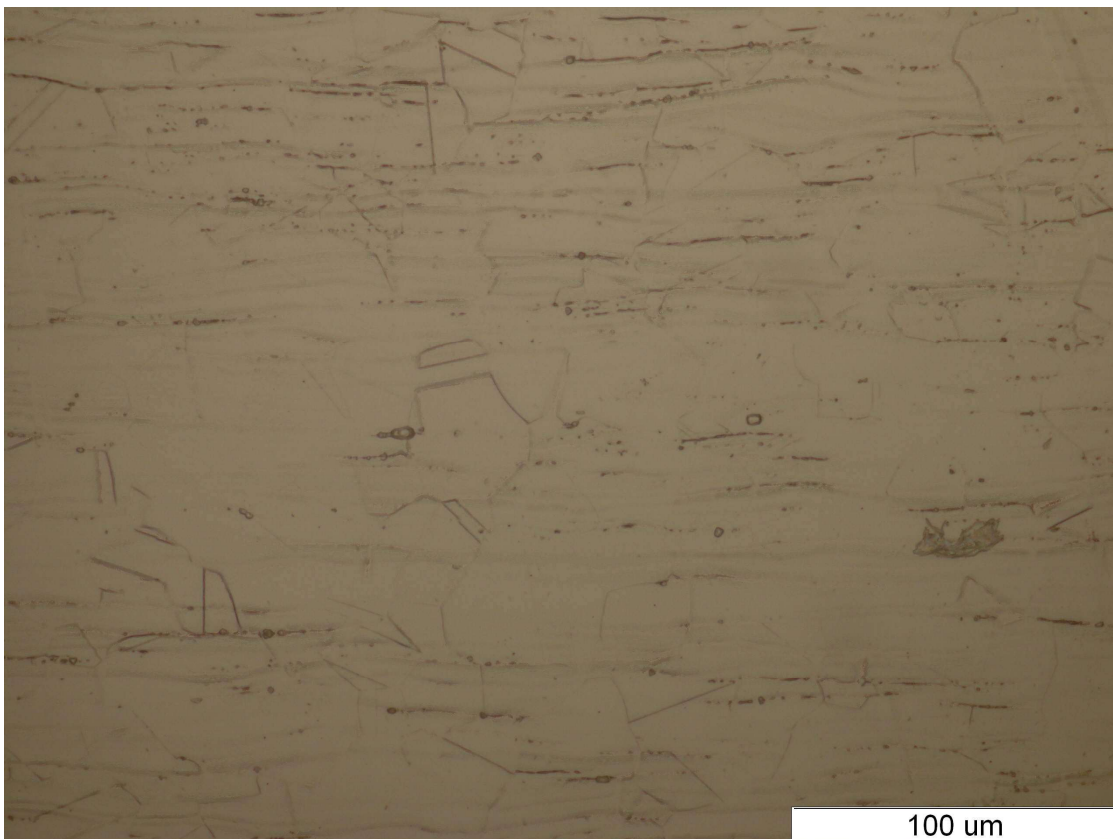
**Slika 22. AISI 304 (A2) povećanje 200x**



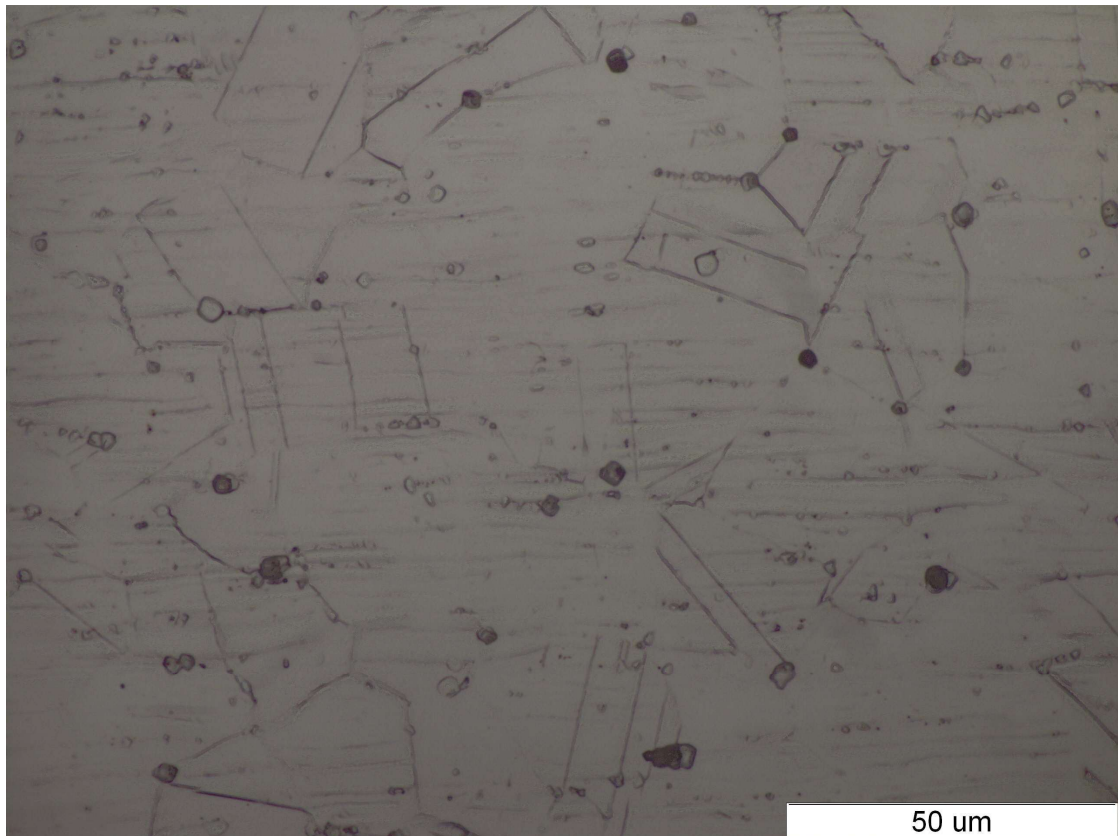
**Slika 23. AISI 316 (A4) povećanje 200x**



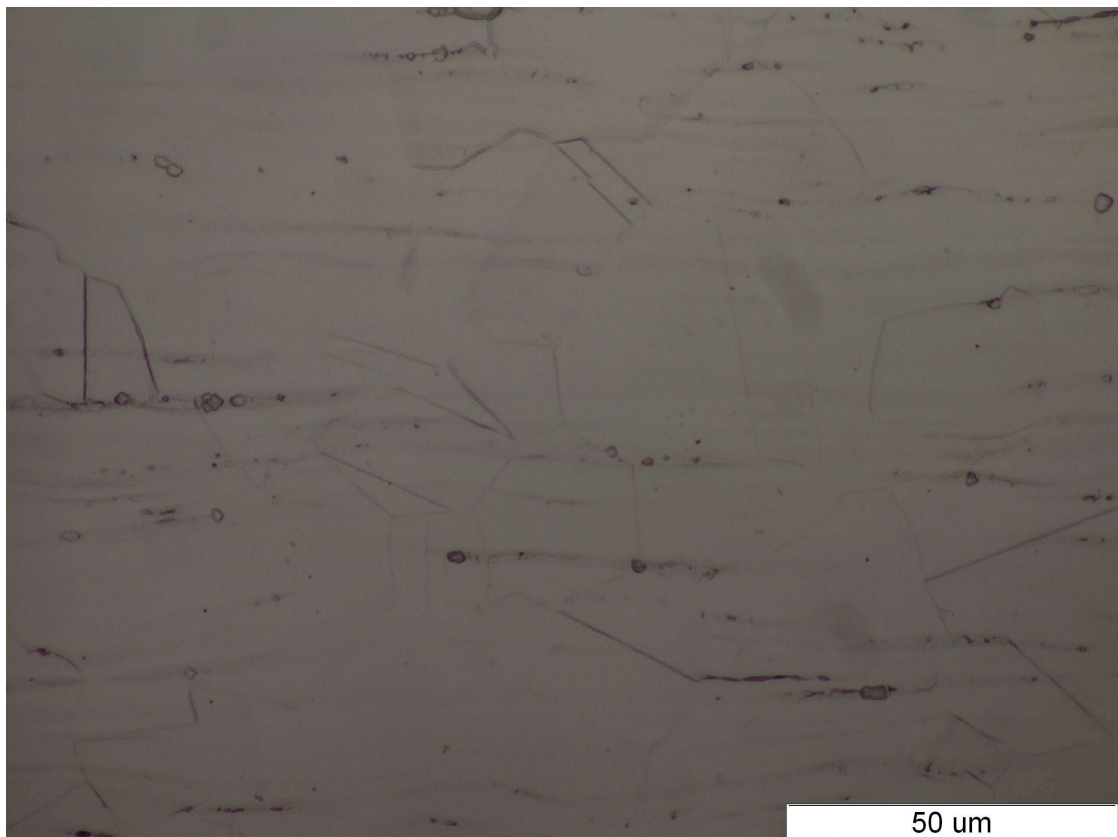
**Slika 24. AISI 304 (A2) povećanje 500x**



**Slika 25. AISI 316 (A4) povećanje 500x**



**Slika 26. AISI 304 (A2) povećanje 1000x**



**Slika 27. AISI 316 (A4) povećanje 1000x**

Na slikama 20 do 27 vidljivo je da oba čelika imaju austenitnu strukturu. Prilikom povećanja od 100x mikrostruktura materijala AISI 316 (A4) izgleda kao da je valjana jer je usmjerena vodoravno. Tu nam je razlika u mikrostrukтури najveća, dok kod većih povećanja mikrostrukturne razlike nisu bitno različite.

## 6. ZAKLJUČAK

Abrazijsko trošenje je najučestalije trošenje koje se javlja na materijalima. Iako za korozijski postojane čelike otpornost na abrazijsko trošenje nije primarno svojstvo oni su također izloženi istom. Metoda “suhi pijesak/gumeni kotač” je najčešće korištena metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.

Materijal AISI 316 (A2, X5CrNiMo17-12-2) je legiran u većoj mjeri sa molibdenom te ima veću otpornost na koroziju od AISI 304 (A2, X5CrNi18-10.). Rezultati ispitivanja pokazuju da čelik AISI 304 (A2,) ima veću tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje.

Korozijski postojani čelici se koriste za različite svrhe gdje trošenje nije primarna funkcija.

Materijal AISI 316 (A4) ima veći udio molibdena te se koristi u primorskim područjima. Razlog tomu je što u blizini morske obale atmosfera sadrži halogenide (osobito kloride) koji padaju na materijal i talože se na njemu. S vremenom dolazi do veće koncentracije klorida na materijalu nego u zraku. Ista stvar se događa i u kontaktu sa morskom vodom, tako da je potrebna veća otpornost na koroziju.

Materijal AISI 304 (A2) je najkorištenija vrsta nehrđajućeg čelika. Dobro se oblikuje i zavaruje a pretežno se koristi u kontinentalnim dijelovima.



## 7. LITERATURA

- [1] Applications for stainless steel in the water Industry, The steel construction institute, 1999.
- [2] Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2011.
- [3] Pavlinec, M.: Utjecaj stanja površine na korozivsku postojanost nehrđajućih čelika, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [4] Outokumpu, Outokumpu corrosion handbook, tenth edition, Espoo, 2009..
- [5] <http://www.amse.org.cn/article/2014/1006-7191-27-2-279.html>
- [6] <http://www.smithshp.com/metals/duplex-stainless-steels.htm>
- [7] A. John Sedriks, Corrosion of stainless steels, second edition, Toronto, 1996.
- [8] Design manual for structural stainless steel, Nickel development institute, Euro Inox, 1994.
- [9] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.
- [10] Dobranić, B.: Trošenje dijelova građevinskih strojeva, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2012.
- [11] Standard ASTM: G 65 - 85: Conducting dry sand/rubber wheel abrasion tests
- [12] Robertino, Mileta: Istraživanje otpornosti na trošenje toplinski obrađenih čelika za izradu topničkih oružja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000
- [13] [en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_cleaning](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_cleaning)