

# Postupak bruniranja korištenjem ulja za motore

---

Meštrić, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:060638>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

Završni rad br. 424/PS/2023

## Postupak bruniranja korištenjem ulja za motore

Karlo Meštrić, 0336037148

Varaždin, rujan 2023. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Završni rad br. 424/PS/2023

## Postupak bruniranja korištenjem ulja za motore

**Student**

Karlo Meštrić, 0336037148

**Mentor**

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl.ing.stroj.

Varaždin, rujan 2023. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Karlo Meštrić	MATIČNI BROJ	0336037148
DATUM	15.09.2023.	KOLEGIJ	Površinska obrada materijala
NASLOV RADA	Postupak bruniranja korištenjem ulja za motore		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Burnishing treatment using motor oil		

MENTOR	dr.sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva		
	2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. Marko Horvat, dipl.ing.stroj., član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Zlatko Botak, rezervni član povjerenstva		
	5.		

## Zadatak završnog rada

BROJ	424/PS/2023
OPIS	<p>U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti i opisati metode zaštite od korozije koje se primjenjuju u industriji. U prvom dijelu rada potrebno je definirati koroziju i usporediti sve njene pojavne oblike. Potrebno je opisati načine djelovanja različitih vrsta korozijskih procesa te oštećenja koja korozija izaziva. Potrebno je pojasniti i razdijeliti postupke inženjerstva površine. Posebno detaljno opisati i klasificirati postupak bruniranja. Opisati sve poznate postupke bruniranja te rezultate koje oni daju u zaštiti metala od korozije.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada izvesti postupak bruniranja zagrijavanjem i uranjanjem u motorno ulje ispitnih uzoraka od dva različita čelika. Na obrađenim površinama ocijeniti kvalitetu samom izvedenog postupka. Donijeti vlastiti zaključak o izvedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>

ZADATAK URUČEN	19.09.2023.	POTPIS MENTORA	M. Bušić
----------------	-------------	----------------	----------



## Sažetak

U ovom završnom radu opisana je površinska obrada materijala bruniranjem. Bruniranje je postupak kojim se na površini materijala na bazi željeza postiže formiranje magnetitnog sloja. Osnovni ciljevi su postići bolja vizualna svojstva, ali se također u manjoj mjeri poboljšava i otpornost na koroziju. U radu su također navedene i opisane vrste korozije te osnovne vrste trošenja koje se javljaju u strojarstvu. Također opisani su načini površine zaštite materijala kojima se produkuje njihov vijek u eksploataciji. U sklopu praktičnog dijela, proveden je jednostavan eksperiment s ciljem pokazivanja nastanka bruniranog sloja na čeličnim pločicama te je provedena analiza na mikroskopu.

Ključne riječi: bruniranje, površinska zaštita materijala, korozija

## **Summary**

In this final paper, the surface treatment of materials through burnishing is described. Burnishing is a process that forms a magnetite layer on the surface of an iron-based materials. The main goals are to achieve better visual properties, but to a lesser extent, corrosion resistance is also improved. The paper also lists and describes the types of corrosion and basic forms of wear that occur in mechanical engineering. Additionally, methods of material surface protection are described which prolong their lifetime. As part of the practical section, a simple experiment was conducted to demonstrate the formation of a burnished layer on steel plates, followed by analysis under a microscope.

Key words: burnishing, surface protection of material, corrosion



## Popis korištenih kratica

<b>BDP</b>	Bruto domaći proizvod
<b>CO</b>	Ugljični monoksid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Ugljični dioksid
<b>H<sub>2</sub></b>	Vodik
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Voda
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Hematit
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	Magnetit
<b>FeO</b>	Wustite
<b>C</b>	Ugljik
<b>Cr</b>	Krom
<b>Mo</b>	Molibden
<b>TIG</b>	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (engl. Tungsten Inert Gas)
<b>REL</b>	Ručno elektrolučno zavarivanje
<b>MIG</b>	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnog zaštitnog plina (engl. Metal Inert Gas)
<b>MAG</b>	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog plina (engl. Metal Active Gas)
<b>EPP</b>	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
<b>HVOF</b>	Visokobrzinsko plameno naštrcavanje (engl. High Velocity Oxygen Fuel)
<b>W</b>	Volfram
<b>Cu</b>	Bakar
<b>CVD</b>	Kemijsko nanošenje prevlaka iz parnih faza (engl. Chemical Vapor Deposition)
<b>PVD</b>	Fizičko nanošenje prevlaka iz parnih faza (engl. Physical Vapor Deposition)
<b>NaOH</b>	Natrijev hidroksid
<b>KNO<sub>3</sub></b>	Kalijev nitrat
<b>NaNO<sub>2</sub></b>	Natrijev nitrit
<b>NaNO<sub>3</sub></b>	Natrijev nitrat
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	Željezov klorid
<b>HgCl<sub>2</sub></b>	Živin klorid
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Vodikov peroksid
<b>ZnCl<sub>2</sub></b>	Cinkov klorid
<b>NH<sub>4</sub>Cl</b>	Amonijev klorid
<b>HCl</b>	Klorovodik

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Korozija.....	3
2.1.	Općenito o koroziji.....	3
2.2.	Klasifikacija korozijskih procesa .....	4
2.3.	Mehanizmi nastajanja korozije.....	5
2.3.1.	<i>Kemijska korozija</i> .....	5
2.3.2.	<i>Elektrokemijska korozija</i> .....	8
2.4.	Pojavni oblici korozije .....	8
2.4.1.	<i>Opća korozija</i> .....	8
2.4.2.	<i>Interkristalna korozija</i> .....	10
2.4.3.	<i>Selektivna korozija</i> .....	11
2.4.4.	<i>Lokalna korozija</i> .....	11
2.4.4.1.	<i>Pjegasta korozija</i> .....	12
2.4.4.2.	<i>Rupičasta korozija</i> .....	12
2.4.4.3.	<i>Potpovršinska korozija</i> .....	13
2.4.4.4.	<i>Kontaktna korozija</i> .....	14
3.	Trošenje.....	16
3.1.	Abrazija .....	16
3.2.	Adhezija .....	19
3.3.	Umor površine.....	20
3.4.	Tribokorozija.....	21
4.	Inženjerstvo površina .....	23
4.1.	Modificiranje površina .....	23
4.1.1.	<i>Mehaničko modificiranje površina</i> .....	23
4.1.2.	<i>Toplinsko modificiranje površina</i> .....	24
4.1.3.	<i>Toplinsko-kemijsko modificiranje površina</i> .....	26
4.2.	Prevlačenje površina .....	27
4.2.1.	<i>Toplinska prevlačenja površine</i> .....	27
4.2.2.	<i>Mehaničko prevlačenje površina</i> .....	28
4.2.3.	<i>Toplinsko-mehanička prevlačenja površine</i> .....	28
4.2.4.	<i>Kemijsko prevlačenje površina</i> .....	29
4.2.5.	<i>Elektrokemijsko prevlačenje površina</i> .....	30
4.2.6.	<i>Prevlačenje površina iz parnih faza</i> .....	31
5.	Bruniranje .....	32
5.1.	Vrste bruniranja.....	32
5.1.1.	<i>Toplo bruniranje</i> .....	33
5.1.1.1.	<i>Vrste kupelji za toplo bruniranje</i> .....	33
5.1.2.	<i>Hladno bruniranje</i> .....	37
6.	Praktični dio .....	38
6.1.	Ispitni uzorci.....	38
6.2.	Svojstva ispitnih uzoraka .....	38

6.3. Oprema za provođenja eksperimenta .....	39
6.4. Prvi test.....	41
6.5. Drugi test.....	42
7. Analiza rezultata .....	45
7.1. Analiza pločice S235JR .....	45
7.2. Analiza pločice 25CrMo4 .....	48
8. Zaključak.....	51
9. Literatura.....	53





# 1. Uvod

U gotovo svim granama industrije, poput automobilske, zrakoplovne, građevinske, naftne, elektronske, vojne itd., koriste se tehnički materijali koji su podložni različitim utjecajima i čimbenicima koji nepovoljno utječu na njihova svojstva te samu namjenu, poput korozije, abrazije, adhezije, umora površine i tribokorozije [1].

S obzirom na to da troškovi koji nastaju samo od korozije iznose 2,7 trilijuna dolara godišnje, odnosno 3,4% globalnog BDP-a [1], može se zaključiti kako je vrlo bitno provoditi postupke kojima će se bilo izborom materijala, različitim konstrukcijskim rješenjima, održavanjem ili površinskim zaštitama materijala smanjiti troškovi te poboljšati njihova svojstva. U strojarstvu, ali i ostalim grana, koriste se strojni dijelovi i konstrukcije kod kojih je osim već spomenutih zahtjeva potrebno postići i određena estetska svojstva. Često je potrebno postići određeni sjaj i čistoću površine kao npr. kod različitih kućišta, ograda ili je potrebno postići mat efekt koji ima veliku primjenu u vojnoj industriji.

Jedan od načina dobivanja takvih je bruniranje. Bruniranje se počinje koristiti još u 19. stoljeću za obradu oružja, a do danas su se razvile modernije tehnike koje pružaju bolja antikorozivna i vizualna svojstva. Najčešće se koristi u vojnoj industriji kod završne obrade oružja kako bi se postigla tamna mat prevlaka koja zajedno s tankim slojem ulja štiti i od korozije (slika 1.1.).



*Slika 1.1. Prikaz bruniranog pištolja [2]*

U ovom završnom radu opisuje se na koji način korozija djeluje na materijale, vrste trošenja koje susrećemo u strojarstvu te načine zaštite od korozije i trošenja, a detaljniji će fokus biti na bruniranju.

## 2. Korozija

### 2.1. Općenito o koroziji

Jedna od vrlo nepoželjnih, često i neizbježnih pojava koja negativno utječe na materijale je korozija. Korozija se može definirati na više načina, ali generalno korozija je proces koji razara konstrukcijske materijale kemijskim ili elektrokemijskim putem uslijed doticaja s okolinom. Iako korodirati mogu i materijali poput polimera, keramike, stakla, kada se govori o koroziji, a ne spominje se konkretno koji materijal tada se podrazumijeva korozija metala [3].

Korozija je vrlo nepoželjna pojava koja može dovesti do vrlo skupih popravaka, ekoloških katastrofa i gubitka života pa je stoga predmet izučavanja znanstvenika kako bi se njezine neželjene pojave svele na minimum [1].

Tijekom povijesti, događale su se različite nesreće koje su uzrokovale velike gubitke života. 15. prosinca 1967. godine došlo je do rušenja Silver Bridge mosta u SAD-u koji je povezivao Ohio i Zapadnu Virdžiniju prilikom čega je život zgubilo 46 ljudi, a most se srušio zbog napetosne korozije [4].



*Slika 2.1. Srušeni most „Silver Brigde“ u Ohio-u [5]*



Nepravilno održavanje tehničkih materijala ili sustava može dovesti do vrlo skupih popravaka, ekoloških katastrofa ili gubitka ljudskih života.

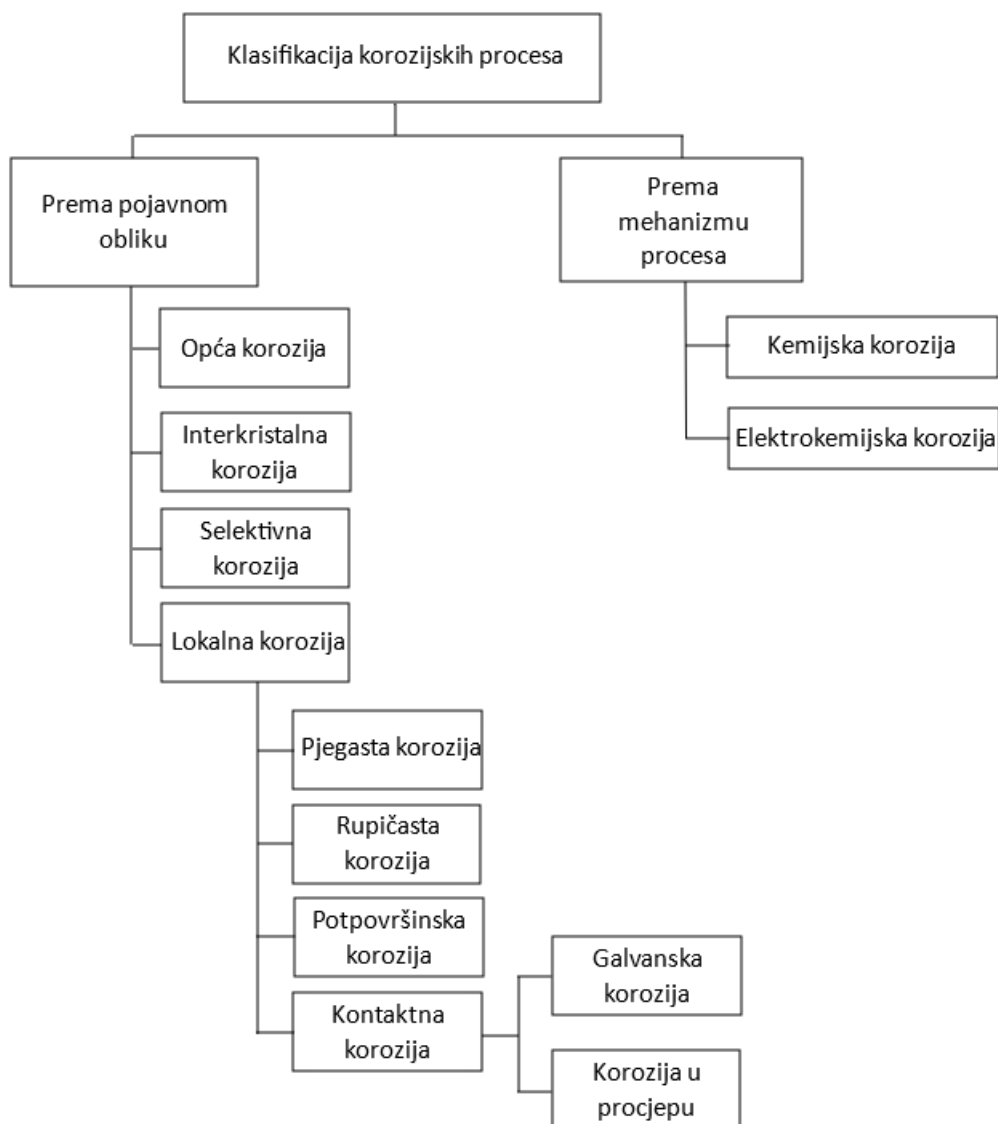
Troškovi koji nastaju mogu biti:

- direktni troškovi:
  - zamjena oštećene opreme
  - reparaturno održavanje
  - provođenje zaštite itd.
- indirektni troškovi:
  - gubitak medija
  - onečišćenje
  - kontaminacija
  - zaustavljanje proizvodnje itd.

## **2.2. Klasifikacija korozijskih procesa**

Korozijski procesi se dijele prema:

- mehanizmu procesa korozije
- razdiobi na površini materijala
- mediju u kojem se odvija
- vezi s drugim razarajućim utjecajima
- prema vremenskom tijeku
- materijalu koji korodira [1].



Slika 2.2. Prikaz klasifikacije korozivskih procesa

## 2.3. Mehanizmi nastajanja korozije

### 2.3.1. Kemijska korozija

Kemijska korozija je vrsta korozije koja se odvija u neelektrolitima, tj. u medijima koji ne provode električnu struju. Korozija se događa izravnom kemijskom reakcijom između materijala i medija uslijed čega nastaju spojevi poput oksida, sulfida, karbida ili mješavine tih vrsta. Oksidi koji nastaju na površini metala uglavnom su poluvodiči. Oksidi mogu biti p ili n-tipa. Oksidi p-tipa imaju u kristalnoj rešetki manjak kationa, a oksidi n-tipa manjak aniona ili višak kationa. Kemijska reakcija koja se događa između materijala i medija ovisi o kemijskom afinitetu između

materijala i okoline. Kemijski afinitet je sklonost kemijske reakcije između dva elementa, a ovisi o temperaturi i koncentraciji reaktanata [1, 6].

Ovisno o mediju u kojem se kemijska korozija može odvijati, dijeli se na:

- plinsku koroziju
- koroziju u tekućim neelektrolitima.

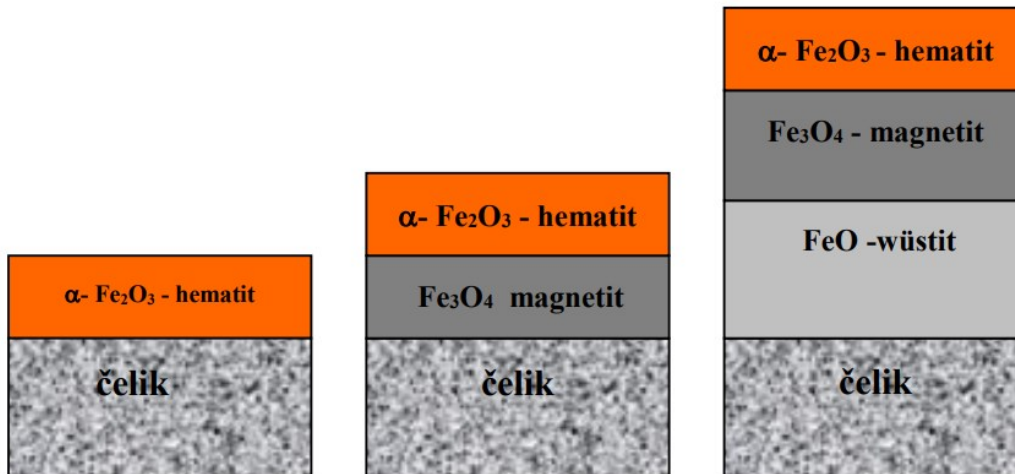
Plinska korozija zbiva se u suhim plinovima ili plinovima čija je temperatura veća od 100 °C. Najčešće se radi o dimnim plinovima, vrućem zraku ili plinovima nastalim izgaranjem goriva. Također se odvija i pri vrućoj obradi metala lijevanjem, valjanjem, zavarivanjem, prešanjem i sl. Korozija u tekućim neelektrolitima je korozija metala organskim tvarima kao što je npr. razaranje metala u nafti pod utjecajem sumpora ili njegovih spojeva [1].

Prema sredini u kojoj se kemijska korozija odvija, može se podijeliti prema aktivnosti kisika na oksidirajuće i reducirajuće atmosfere. Oksidirajuća atmosfera sadrži molekularni kisik. Ovdje je aktivnost kisika vrlo visoka i može se kontrolirati koncentracijom molekularnog kisika. U reducirajućoj atmosferi je aktivnost kisika vrlo mala, a kontrolirana je odnosom CO/CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O.

Na slici 2.3. može se vidjeti postupak formiranja željeznih oksida. Na početku dolazi do stvaranja Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hematit sloja na površini čelika koji se stvara već za samo nekoliko sati na sobnoj temperaturi. Debljina ovog sloja je manja od 100 nm i dobro štiti metalnu površinu, a dokazati se može samo znanstvenim metodama jer se boja metala može vidjeti i preko ovog sloja.

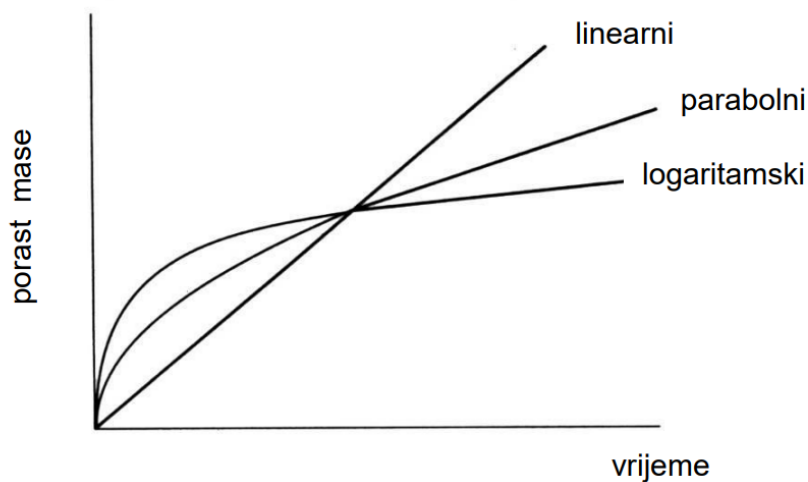
Na temperaturama od 200 do 450 °C, stvaraju se slojevi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetita i sloj Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hematita. Ovi slojevi vidljivi su golim okom, a debljina im iznosi od 100 do 200 nm.

Na kraju dolazi do stvaranja slojeva FeO wüstita, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetita i sloj Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hematita. Ovi slojevi nastaju na površini čelika pri temperaturama većim od 450 °C, a debljine su oko 1000 nm [6].



Slika 2.3. Stvaranje slojeva oksida na površini čelika u vrućem zraku [6]

Općenito je rast oksidnog sloja na početku vrlo brz, a s povećanjem debljine sloja se brzina rasta smanji.



Slika 2.4. Prikaz rasta oksidnog sloja [6]

Linearni rast oksidnog sloja nastaje kada je sloj formiran kao propustan, tj. kada ne pokriva čitavu površinu metala.

Parabolni rast oksida nastaje kada je oksidni sloj kompaktan i stvara jednoličnu barijeru difuziji kisika. U ovom slučaju je brzina rasta oksidnog sloja obrnuto proporcionalna njegovoj trenutačnoj debljini.

Logaritamski rast se javlja kod niskih temperatura kada u početku oksidni sloj ne pokriva cijelu površinu metala i brzina difuzije kisika je velika, a nastankom debljeg i nepropusnog sloja se brzina smanjuje [6].

Da bi došlo do stvaranja svih oksidnih slojeva na površini metala moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- korozijski produkti moraju biti u čvrstom stanju i fizikalno i kemijski postojani
- kristalna rešetka spoja koji nastaje kemijskom korozijom mora omogućiti dobro vezanje između metala i oksidnog sloja
- koeficijent toplinskog istezanja metala i nastalog površinskog sloja mora biti približno jednak
- mehanička svojstva korozijskog produkta moraju biti povoljna
- Pilling – Bedworthov omjer mora biti veći od 1 [1].

### **2.3.2. Elektrokemijska korozija**

Elektrokemijska korozija je kemijski redukcijско-oksidacijski proces do kojeg dolazi kada su metali ili legure u doticaju s elektrolitima što su najčešće voda, vodene otopine kiselina, lužina i soli i vlažna tla. Ova vrsta korozije jedna je od najčešćih oblika jer su konstrukcijski materijali i elementi vrlo često izloženi utjecaju agresivne okoline i medija [1].

Do elektrokemijske korozije dolazi zbog postojanja lokalnih korozijskih članaka na površini metala. Pri tomu se neplemenitiji dijelovi anode, a plemenitiji katode. Na neplemenitijom dijelovima dolazi do trošenja metala procesom ionizacije te dolazi do oslobađanja viška elektrona koji kroz metal putuju do katoda [1].

## **2.4. Pojavni oblici korozije**

### **2.4.1. Opća korozija**

Opća korozija je najčešći i najmanje opasni oblik korozije koji zahvaća čitavu površinu materijala. Može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. U praksi se proces može lako pratiti u predvidjeti kada treba predmet zamijeniti novim [6].



Slika 2.5. Prikaz opće korozije [7]

Do opće korozije dolazi kada je čitava površina metala izložena agresivnoj sredini, a najčešće se pojavljuje na velikim ploham (limovima).

Materijali se mogu zaštititi od opće korozije metodama poput prevlačenja materijala različitim prevlakama, katodnom zaštitom, inhibitorima ili različitim konstrukcijsko tehnološkim mjerama.

Brzina korozije, kao i brzina prodiranja korozije u materijal, ovisi o metalu, okolini, korozijskim i fizikalnim uvjetima u kojima se proces događa. Najčešća metoda ispitivanja korozije je određivanje gubitka mase, na način da se materijal izvaže prije i nakon izlaganja agresivnoj okolini [6].

Prosječna brzina korozije se određuje prema sljedećoj formuli:

$$\bar{v} = \frac{|\Delta m|}{S \cdot t} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right]$$

gdje je:  $|\Delta m|$  - gubitak mase konstrukcijskog materijala,

$S$  - veličina površine koja se troši,

$t$  - vrijeme izlaganja agresivnoj okolini.

Često se umjesto prosječne brzine korozije primjenjuje brzina prodiranja korozije u konstrukcijski materijal, a izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$\bar{v}_p = \frac{\bar{h}}{t} = \frac{|\Delta V|}{S \cdot t} = \frac{|\Delta m|}{\rho \cdot S \cdot t} = \frac{\bar{v}}{\rho} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{god}} \right]$$

gdje je:  $\bar{h}$  - dubina prodiranja

$\rho$  - gustoća materijala

$\Delta V$  - gubitak volumena konstrukcijskog materijala [6].

S obzirom na prijašnje formule, izrađena je tablica 1. koja prikazuje klasifikaciju upotrebljivosti konstrukcijskih materijala s obzirom na brzinu prodiranja korozije.

Tablica 2.1. Upotrebljivost materijala s obzirom na prosječnu brzinu prodiranja korozije [6]

Postojanost materijala	Upotrebljivost materijala	Prosječna brzina prodiranja korozije $\bar{v}_p$ [mm/god]
potpuno postojan	uvijek upotrebljiv	< 0,001
vrlo postojan	uglavnom upotrebljiv	0,001 do 0,01
postojan	obično upotrebljiv	0,01 do 0,1
smanjeno postojan	katkad upotrebljiv	0,1 do 1
slabo postojan	iznimno upotrebljiv	1 do 10
nepostojan	neupotrebljiv	> 10

Iako tablica 1. daje orijentacijsku upotrebljivost materijala, u praksi ona ponekad ne određuje upotrebljivost. Na primjer sifon u kemijskoj industriji koji je lako zamijeniti smije korodirati brzinom od 6 mm/god, a cijevi za mrežu komprimiranog zraka ne smiju prelaziti brzinu korodiranja veću od 0,05 mm/god [6].

#### 2.4.2. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je oblik korozije koji razara materijal po granicama zrna. Najčešće se pojavljuje kod legura, a povezan je s pojavom senzibilizacije. Senzibilizacija je proces kod kojeg uslijed unosa topline dolazi do izlučivanja precipitata, nečistoća ili segregata na granice zrna što dovodi do nastanka interkristalne korozije. Iako je ovo najopasniji oblik korozije zato što nema vidljivih tragova na površini metala, danas više nije tako opasna jer postoje načini da se izbjegne pojava senzibilizacije npr. snižavanjem udjela ugljika i legiranje titanijem i niobijem.

### 2.4.3. Selektivna korozija

Selektivna korozija se definira kao proces koji razara samo jednu fazu ili samo jednu komponentu višefaznog ili višekomponentnog materijala. Ovakva vrsta korozije se najčešće javlja u mjedi i sivom lijevu. Proces selektivne korozije u mjedi naziva se decinkacija mjedi, što je komponentno selektivni proces, a u sivom lijevu grafitizacija, što je fazno selektivni proces. Pošto je u mjedi cink elektrokemijski aktivniji od bakra to dovodi do njegovog izlučivanja iz mjedi čime nastaje relativno čist i porozan bakar koji ima loša mehanička svojstva. Povećanje temperature može ubrzati ovaj proces. Grafitizacija je proces kod kojeg se željezo selektivno otapa iz sivog lijeva što daje krhku i poroznu smjesu inertnog grafita [1, 6].



*Slika 2.6. Primjer grafitizacije na cijevi od lijevanog željeza [8]*

### 2.4.4. Lokalna korozija

Lokalna korozija zahvaća samo određene dijelove površine materijala te se prema tome može podijeliti na:

- pjegastu koroziju
- rupičastu koroziju
- potpovršinsku koroziju
- kontaktnu koroziju.



#### 2.4.4.1. Pjegasta korozija

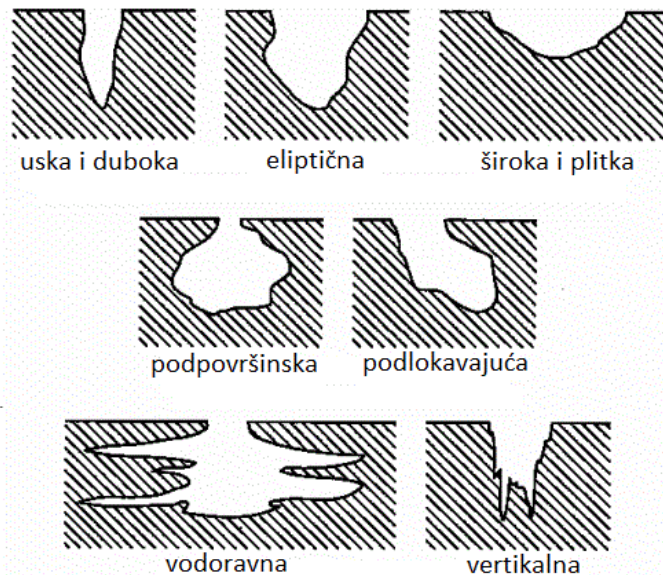
Pjegasta korozija spada u lokalni tip korozije. Jedna je od najčešćih vrsta lokalne korozije koja se javlja samo na određenim mjestima gdje je površina relativno velika u odnosu na dubinu. Ova vrsta korozije zahvaća samo anodna mjesta na površini materijala što daje za rezultat loš estetski izgled materijala.



*Slika 2.7. Prikaz pjegaste korozije [1]*

#### 2.4.4.2. Rupičasta korozija

Rupičasta (pitting) korozija jedan je od najčešćih oblika elektrokemijskog razaranja materijala koja nastaje lokalnom depasivacijom materijala – uništenja pasivnog oksidnog sloja. Uzrok rupičaste korozije su najčešće kloridni ioni u vodenim otopinama koji dovode do razaranja pasivnog filma na materijalu. Ovaj oblik korozije smatra se autokatalitičkim procesom. To znači da u početku procesa kada se tek pojavi korozivna jamica (pit), dolazi do promjena u mediju koji se nalazi unutar pita koji onda sprječava repasivaciju i potiče daljnje širenje pita. Kada se pit jednom inicira, on ima tendenciju širiti se samo u dubinu, najčešće na jedan od načina prikazanim na slici 8. [6].



Slika 2.8. Pojavni oblici rupičaste (pitting) korozije [9]

Ova vrsta korozije često zahvaća materijale koji se nalaze u pasivnom stanju poput nehrđajućih čelika. Oksidi koji nastaju na nehrđajućim čelicima, koji mogu biti različitog kemijskog sastava i debljine, negativno utječu na stvaranje zaštitnog pasivnog filma te se iz tog razloga primjenjuju sljedeći postupci u svrhu smanjenja sklonosti nastanka rupičastoj (pitting) koroziji:

- povećanje otpornost materijala
- smanjenjem hrapavosti površine
- smanjenjem agresivnosti korozijskog okoliša
- katodnog zaštitom
- inhibicijom [1].

#### 2.4.4.3. Potpovršinska korozija

Potpovršinska korozija se pojavljuje u dubljim dijelovima materijala te raslojava sami materijal. Najčešće se javlja u valjanim materijalima, poput limova, u dodiru s morskom vodom ili kiselinama. Ova vrsta korozije izaziva bubrenje ili listanje. Kod bubrenja materijala korozijski produkti su većeg volumena od volumena uništenog materijala pa se prepoznaje po nastalim mjehurima. Kod listanja, koje se još naziva raslojavanje ili eksfolijacija, žarište rupičaste korozije (pittinga) se širi u dubinu materijala što dovodi do samog raslojavanja materijala [1, 10].



*Slika 2.9. Prikaz potpovršinske korozije [11]*

#### **2.4.4.4. Kontaktna korozija**

Kontaktna korozija se dijeli na galvansku koroziju, koja se javlja između materijala različitih elektrodnih potencijala, te na koroziju u procijepu.

Galvanska korozija javlja se kada su materijali različitih potencijala u međusobnom električnom kontaktu u nekom elektrolitu. Do galvanske korozije najčešće dolazi jer u praksi često nije moguće izvesti sve konstrukcije s istim materijalima. Kod dva materijala koja su u međusobnom dodiru, materijal koji je manje plemeniti, odnosno koji ima niži električni potencijal, ponašat će se kao anoda, tj. oksidirat će. Intenzitet galvanske korozije ovisit će o razlici potencijala između materijala, o okolini u kojoj se nalaze, o polarizaciji te geometrijskom odnosu. Galvanska korozija ne mora se dogoditi samo neposrednim kontaktom dva materijala, već do nje može doći i ukoliko dolazi do taloženja korozijskih produkta plemenitijeg materijala na neplemenitiji materijal npr. u distribucijskim sustavima tople vode [6].

Kako bi se galvanska korozije spriječila ili usporila, u praksi se:

- odabiru materijali koji imaju iste ili relativno bliske električne potencijale
- koristi se izolacija između kontakata materijala
- izolacijom anodnog metala od okoline [1].



*Slika 2.10. Prikaz galvanske korozije između vijka i matice [12]*

Korozija u procijepu inicira se u blizini pukotina na materijalu. Ona se najčešće pojavljuje kao posljedica loše oblikovanih konstrukcija i tehnologije izrade. Također može se javiti i ispod naslaga i nečistoća, te na mjestima gdje radi loših geometrijskih rješenja konstrukcije dolazi do zadržavanja medija koji uzrokuje koroziju. Stoga treba odabrati optimalna konstrukcijsko-tehnološka rješenja kako bi se ova vrsta korozije spriječila ili usporila.

### 3. Trošenje

U strojarstvu osim korozije velike probleme izaziva i trošenje materijala. Trošenje je progresivan gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidiom i/ili česticama. Rješenja i razumijevanje o trošenju i probleme koje ono izaziva daje tribologija. Tribologija je interdisciplinarna znanost koja se bavi problemima trenja i trošenja. Tribologija je vrlo bitna jer trošenje ima negativan utjecaj na tribosustave, odnosno sustave u kojima postoji gibanje između pojedinih elemenata, na način da:

- smanjuje vijek trajanja pojedinih elementa i sustava
- smanjuje pouzdanost
- smanjuje sigurnost
- povećava troškove održavanja
- povećava gubitak energije
- povećava otpad itd.

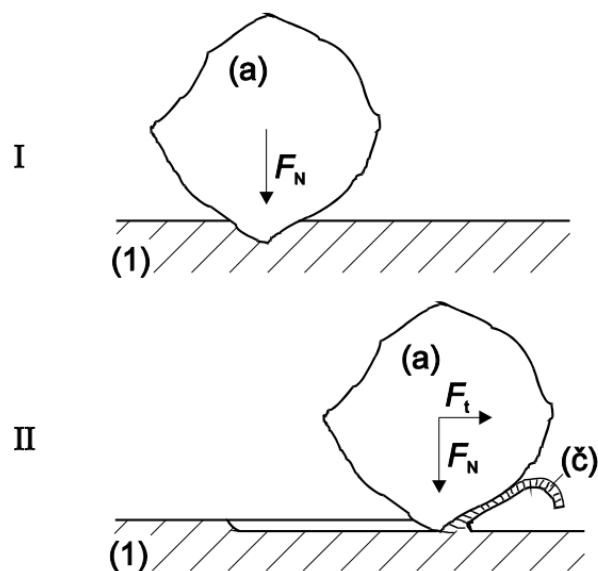
Protiv trošenja se može boriti izborom materijala, inženjerstvom površina, konstrukcijskim rješenjima i podmazivanjem.

Mehanizmi trošenja su dijele na četiri osnovne vrste:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija.

#### 3.1. Abrazija

Abrazija je jedan od najčešćih mehanizma trošenja materijala. Može se definirati kao postupno trošenje materijala uzrokovano česticama ili izbočinama. Preciznije rečeno, abrazija je mikrorezanje materijala abrazivom nedefinirane geometrije oštrice koja se događa u dvije faze jediničnog događaja (slika 11.) Abrazivi su tvrde čestice najčešće od kamena, stakla, keramike, cementa i sl. [13, 14].



Slika 3.1. Jedinični događaj abrazije u dvije faze [13]

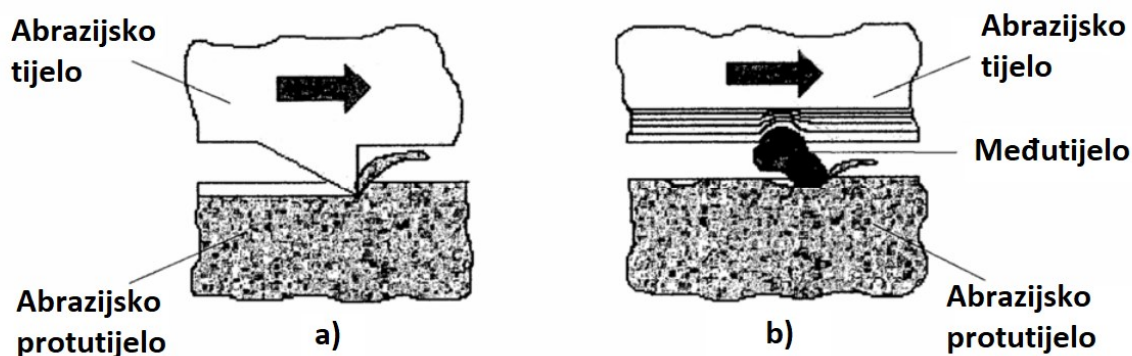
Jedinični događaj abrazije se odvija u dvije faze:

- U fazi I abrazivna čestica (a) prodire u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile  $F_N$
- U fazi II abrazivna čestica (a) pod utjecajem tangencijalne komponente sile  $F_t$  istiskuje materijal što dovodi do stvaranja produkta ili čestice trošenja (č).

U teoriji se abrazija može prikazati kao proces kod kojeg dolazi do mikrorezanja, odnosno odvajanja čestica materijala u mikropodručju. Mikrorezanje se može prikazati kao pravilna četverostrana piramida koja uz djelovanje sile pod određenim kutom djeluje na površinu materijala. Pravilna četverostrana piramida mora biti veće tvrdoće od materijala u koji prodire jer na taj način dolazi do odvajanja materijala tj. do stvaranja čestica trošenja [14].

Mehanizam abrazije se može razmotriti na nekoliko načina:

1. Mogu se pojaviti dva oblika abrazije:
  - Abrazija u dodiru dva tijela – gdje se tribosustav sastoji od abrazivnog tijela i abrazijskog protutijela
  - Abrazija i dodiru tri tijela – gdje se tribosustav sastoji od abrazivnog tijela i protutijela te međutijela, odnosno čestica koje djeluju abrazivno [13].



Slika 3.2. Abrazija s dva (a) i tri (b) tijela [13]

2. Prema međusobnom djelovanju abrazijskih čestica i površina postoji:

- Mikrobrazdanje – u ovom slučaju je odneseni materijal proporcionalan volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom kod prolaza jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkta trošenja. U idealnom će slučaju, umjesto da abrazivne čestice proizvedu produkte trošenja, materijal će se potisnuti bočno što će se očitovati nastankom „bočnih grebena“
- Mikrorezanje – kod mikrorezanja će volumen produkta trošenja biti jednak volumenu nastalog zareza prolaskom abrazivnih čestica
- Mikronaprnuća – ovdje će abrazivne čestice odnositi veće dijelove materijala s krhke površine na način da izazovu mikropukotine koje će se dalje širiti
- Mikroumor – kod mikroumora produkti trošenja nastaju zbog umora površine čiji je uzrok učestalo izmjenično opterećenje. Zbog trenutnih deformacija nastaju mikropukotine koje imaju tendenciju širiti se i naposljetku uzrokuju odvajanje materijala od površine. Do mikroumora također može doći zbog višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja [13].

3. O međusobnoj ovisnosti tvrdoća abraziva i materijala u praksi se razlikuju tri slučaja:

- „čista“ abrazija
- selektivna abrazija
- „nulta“ abrazija.

„Čista“ abrazija se javlja kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće trošne podloge. Ovo je klasičan slučaj abrazije te će čestice trošenja poprimiti oblik spiralne strugotine ukoliko je abradirani materijal duktilan, ili lomljene čestice ukoliko je abradirani materijal krhak.

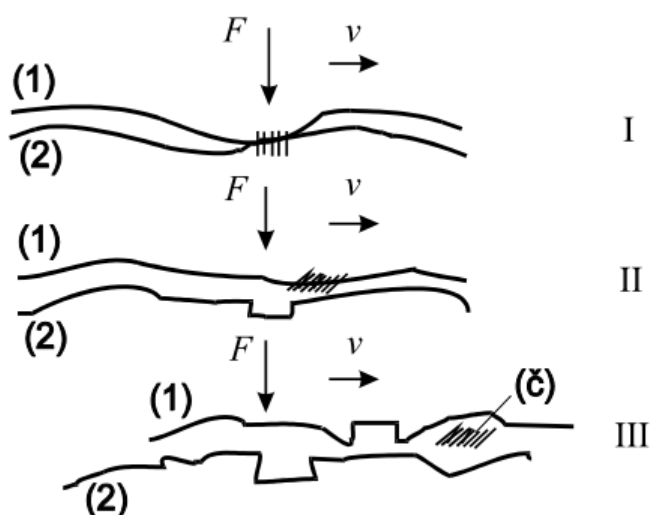
Selektivna abrazija nastaje kada u materijalu postoji tvrđa i mekša faza od abraziva. U tom slučaju će abraziv „rezati“ samo zahvaćeni sloj mekše faze, a površina će izgledati izbrazdano s prekidima na mjestima gdje se nalazi tvrđa faza.

„Nulta“ abrazija se javlja kada je površina materijala tvrđa od površine abraziva. Ovdje bi čestice trošenja trebale biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Ova vrsta abrazije je najčešća na površinama materijala koji su već prošli postupke modificiranja ili prevlačenja površina poput cementiranja, kaljenja, naštrcavanja itd. [13].

### 3.2. Adhezija

Adhezija je po svojoj definiciji stanje u kojem se dvije površine drže zajedno uslijed djelovanja privlačnih sila zbog interakcije molekula, atoma i iona. Do adhezije između dviju površina može doći kemijskim ili fizikalnim povezivanjem. Kemijsko povezivanje se sastoji od izravnog povezivanja molekula materijala kovalentnim ili ionskim vezama. Do fizikalnog povezivanja može doći mehaničkim sidrenjem, fizikalnom apsorpcijom molekula između dva materijala ili međusobnom penetracijom molekula zbog mehanizma difuzije [15].

U strojarstvu se adhezijsko trošenje najčešće definira kao gubitak čestica na površini materijala tribosustava uslijed raskidanja adhezijski povezanih, odnosno mikrozavarenih spojeva. Proces adhezije se može opisati u tri faze:



Slika 3.3. Proces adhezije u tri faze [13]

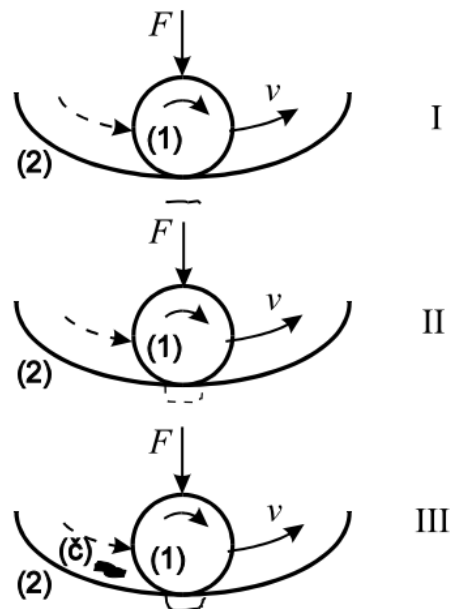


- Faza I – nastajanje adhezijskog spoja na mjestima kontakta dvaju elementa u tribosustavu koji može biti različitog stupnja jakosti
- Faza II – dolazi do raskidanja adhezijskog spoja, a otrgnuta čestica s površine jednog elementa ostaje „nalijepljena“ na površini drugog elementa
- Faza III – dolazi do otkidanja čestice s drugog elementa čime istovremeno dolazi do gubitka materijala iz istog elementa, iako čestica može ostati i trajno navarena na drugom elementu.

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranja adhezivnih veza između kliznog para. Ta sklonost ovisi o njihovoj tribološkoj kompatibilnosti. Podatke o tribološkoj kompatibilnosti daje nam Rabinowitz-ova karta, ali ona najčešće služi samo za orijentacijsku procjenu, a za realne slučajeve se provode pokusi ili koriste podatci prethodnih ispitivanja. [13]

### 3.3. Umor površine

Umor površine definira se kao odvajanje čestica s površine materijala uslijed cikličkih promjena naprežanja. Ovaj proces može se prikazati odvijanjem u tri faze što je prikazano na slici 14. [13].



Slika 3.4. Faze odvijanja umora površine [13]

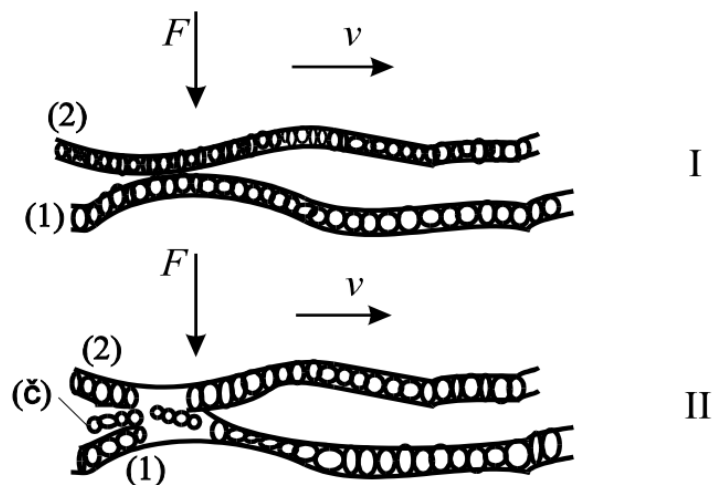
- Faza I – na početku dolazi do stvaranja mikropukotina uslijed cikličkih promjena naprežanja. Mikropukotina se najčešće javlja ispod površine jer se ovdje javlja najveće smično naprežanje kod koncentriranog dodira

- Faza II – u ovoj fazi se mikropukotina širi i pukotina izbija na površinu gdje može doći do odvajanja sitnih kuglastih čestica
- Faza III – na kraju dolazi do odvajanja krupne čestice trošenja koja je najčešće oblika pločice ili iverka.

Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine. Ona ovisi o otporu gibanju dislokacija, a na to utječu zaostala naprezanja, ogrebotine, udubljenja, oksidi i slične tvrde i krhke uključine itd. [13].

### 3.4. Tribokorozija

Tribokorozija se definira kao mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala okolišem. Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje se javlja kod klizanja dviju površina u korozivnom okolišu. Tribokorozija se može prikazati s dvije faze što se vidi na slici 15. [16].



Slika 3.5. Faze tribokorozije [13]

- Faza I – prvo dolazi do stvaranja ili obnavljanja sloja produkta korozije
- Faza II – zatim dolazi do mjestimičnog razaranja sloja produkta korozije.

Tribokorozija je slabo intenzivan oblik mehaničkog trošenja, a odnesene čestice su najčešće praškastog oblika. Iako spada u osnovne vrste mehaničkog trošenja, ona je kombinacija nastanka korozijskih produkta na površini materijala i abrazije, adhezije ili umora površine. Tribokorozija se ponekada i namjerno izaziva kako bi slojevi proizvoda korozije mogli štiti metalne površine od njihovog direktnog dodira, ali ponekad pojedini oblici tribokorozije izazivaju štetne učinke ako

se nalaze u vlažnom okolišu, pod visokim temperaturama ili ako su pod djelovanjem vibracija [16].

## 4. Inženjerstvo površina

Inženjerstvo površina je znanstvena disciplina koja se bavi zaštitom materijala od trošenja. Ona obuhvaća velik broj procesa kojim se materijalu modificira ili prevlači površina s ciljem dobivanja materijala željenih svojstva površine, a najčešće povećane otpornosti na koroziju i povećanu tvrdoću. Inženjerstvo površina može se podijeliti na:

- Modificiranje površina
- Prevlačenje površina.

### 4.1. Modificiranje površina

Modificiranje površina su postupci kod kojih se mijenja struktura i svojstva površinskog sloja materijala bez promjene dimenzija elementa. Ono se može podijeliti na: mehaničko, toplinsko i toplinsko-kemijsko modificiranje površina

#### 4.1.1. Mehaničko modificiranje površina

U mehaničko modificiranje površina spada pjeskarenje i sačmarenje. Pjeskarenje je postupak hladne obrade kojom se u površinu metalnog materijala induciraju lokalna tlačna naprezanja. Ovim postupkom se smanjuju vlačna naprezanja te istovremeno čisti površinu. Također pospješuje se raspodjela naprezanja u površini materijala kada postoje koncentratori naprezanja, odnosno površinski defekti, rupice, zarezi i sl. koji nastaju prilikom toplinskih ili strojnih obrada. Postupak se izvodi na način da se kuglice sudaraju sa metalnom površinom materijala u kontroliranim uvjetima. Na krajnji rezultat pjeskarenja ovise tri čimbenika:

- prekrivenost obrađivane površine
- intenzitet pjeskarenja (nanošenja kuglica)
- oblik i veličina sredstva za pjeskarenje [17].

Pjeskarenje su izvodi u više prolaza. Što će se više prolaza ostvariti, to će biti veća prekrivenost obrađivane površina i dobit će se bolji rezultat. Kuglice kojima se vrši pjeskarenje mogu biti od čelika, keramike i stakla. Staklene kuglice najčešće se koriste za pjeskarenje lakih i obojenih metala te nehrđajućih čelika jer bi ostaci metalnih kuglica mogli kontaminirati obrađivanu površinu što bi dovelo do korozije. Intenzitet pjeskarenja ovisi o nekoliko čimbenika: brzini, tvrdoći, masi kuglica, o kutu udaranja u površinu materijala te vremenu obradu. Intenzitet pjeskarenja ovisi o željenoj dubini sloja. Npr. povećanje veličine kuglice će rezultirati većim

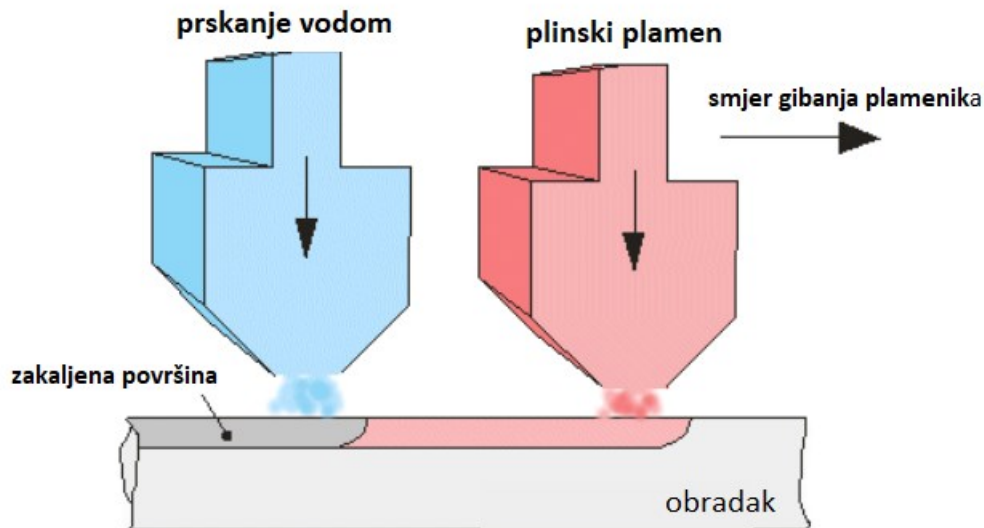
intenzitetom i dubinom sloja, ali i nižim stupnjem prekrivenosti površine. Bitno je pravilno odabrati svaki parametar kod pjeskarenja kako bi se mogla postići željena tlačna naprezanja uz najnižu cijenu [17].

#### **4.1.2. Toplinsko modificiranje površina**

U toplinska modificiranja površine spadaju površinska kaljenja. Ovim postupcima dobiva se martenzitna struktura samo površinskim slojevima dok središnji dio obrađivanog predmeta (jezgra) ostaje meka i žilava. Predmeti se obrađuju na način da se samo površinski slojevi zagriju na temperaturu kaljenja, odnosno temperaturu austenitizacije, te se hlade nadkritičnim brzinama čime dolazi do zakaljenja, odnosno formiranja već spomenutog martenzita koji ima visoku tvrdoću te samim time i otpornost na trošenje, dok jezgra ostaje žilava što daje zadovoljavajuća uporabna svojstva. Površinsko kaljenje se najčešće provodi:

- plameno
- indukcijski
- elektronskim snopom
- laserom [17].

Plameno kaljenje je jedan od najstarijih postupaka otvrdnjavanja površina metalnih dijelova, a izvodi se na način da se predmet grije plinskim plamenom te se gasi prskanjem vodom ili uranjanjem u vodu, ulje ili sintetičko sredstvo (slika 4.1.). Plinovi koji se koriste kod zagrijavanja su najčešće prirodni plin, propan i acetilen koji kod izgaranja s čistim tehničkim kisikom dostižu temperaturu od 2800 do 3000 °C. Za površinsko kaljenje se koriste čelici od 0,35 do 0,7 %C, neki čelici za rad u hladnom stanju (85Cr7, 85CrMo7), sivi lijev i nodularni lijev, a debljina zakaljenog sloja obično iznosi 2 – 6 mm [17, 26].



Slika 4.1. Prikaz površinskog kaljenja [18]

Indukcijsko kaljenje najčešći je postupak površinskog kaljenja zbog produktivnosti i dobrih svojstva zakaljene površine. Obično se koristi za obradu zupčanika, koljenastih osovina, alata, lopatica turbina itd. Ono se provodi na način da se predmet stavlja unutar vodiča kroz kojeg se propušta izmjenična struja te dolazi do stvaranja magnetskog polja oko vodiča. Zbog magnetskog se polja u predmetu stvaraju tzv. „vrtložne struje“ koje se ne induciraju ravnomjerno po poprečnom presjeku, već se neravnomjerno postiže najveća gustoća struje na površini. Ovime dolazi do brzog zagrijavanja površinskog sloja predmeta (ponekad u samo djeliću sekunde) te potom slijedi hlađenje prskanjem ili uranjenjem u vodu, vodenu otopinu polimera ili ulja, a tvrdoća zakaljene strukture je 2 – 3 HRC-a veća od tvrdoće dobivene uobičajenim načinima kaljenja zbog sitnozrnate mikrostrukture nastale zbog brzog načina ugrijavanja [17].

Površinsko zakaljivanje elektronskim snopom provodi se u vakuumskim komorama na način da užarena katoda (izvor snopa) emitira elektrone na obrađivani predmet te prilikom sudaranja elektrona i predmeta dolazi do zagrijavanja površine predmeta na temperaturu austenitizacije, a martenzitna struktura se dobiva samozakaljivanjem. Ovaj postupak se koristi od 1960.-ih godina, a najčešće se koristi u strojarstvu kod izrade ležajeva, ventila, prstenova, cilindra itd. Prilikom ovakve obrade površina predmeta mora biti čista, bez ulja, masti ili korozije, a dubine kaljenja obično iznose od 0,1 do 2 mm [17].

Kod površinskog kaljenja laserom toplinska energija dobiva se apsorpcijom laserskog zračenja međusobnom reakcijom laserskog snopa i slobodnih elektrona u materijalu. Kao i kod prethodnih načina kaljenja, postiže se temperatura austenitizacije, a martenzitna struktura se postiže samozakaljivanjem. Debljina zakaljenog sloja iznosi od 0,1 do 2 mm, a martenzitna struktura ima od 2 do 3 HRC-a višu tvrdoću u odnosu na klasično kaljenje. Primjena laserskog kaljenja je široka, a najčešće se primjenjuje u strojarstvu kod obrade klipova i prstena dizel-motora, kod alata, u svemirskoj tehnologiji itd. [17].

#### **4.1.3. Toplinsko-kemijsko modificiranje površina**

U toplinsko-kemijske načine modificiranja površina najčešće se ubrajaju cementiranje, nitriranje i boriranje.

Cementiranje (pougljičavanje) je jedan od najčešćih i najstarijih postupaka obogaćivanja površinskih slojeva ugljikom. Cilj ovog postupka je dobivanje martenzitne strukture, odnosno velike tvrdoće površine (do 800 HV) uz zadržavanje žilave jezgre čime se povećava otpornost na trošenje i umor površine. Cementiranje se najčešće provodi kod obrade vratila, zupčanika, osovina i sl. Čelici koji su pogodni za cementiranje imaju do 0,25 % ugljika pa se površinski sloj prvo mora obogatiti ugljikom, odnosno sam proces se sastoji od četiri faze:

- pougljičavanje: 850 - 950 °C (800 – 1050 °C kada je potrebno skratiti vrijeme pougljičavanja ili povećati proizvodnost)
- međuzarenje: 650 – 680 °C (ukoliko je potrebno)
- kaljenje: 810 – 840 °C
- niskotemperaturno popuštanje: 175 – 220 °C [17].

Pougljičavanje se provodi u: čvrstim sredstvima, plinu, tekućinama i plazmi. Pošto pougljičavanje u čvrstim sredstvima nije pogodan proces za serijsku proizvodnju i male dubine cementiranja, u praksi se najčešće koristi pougljičavanje u plinskim atmosferama koji je najznačajniji komercijalni postupak radi prihvatljive kvalitete dobivenih površina te cijene postupka i opreme. Ukoliko se žele dobiti površine većih kvaliteta koristi se pougljičavanje u tekućinama, odnosno u solim kupkama, ali predmeti se teže čiste nakon ovakve vrste pougljičavanja. Pougljičavanje u vakuumskim pećima daje bolja mehanička svojstva obratka i kraće vrijeme trajanja postupka, ali je oprema skuplja i potrebna je veća kontrola parametara postupka [26].

Nitriranje je toplinsko-kemijski postupak modificiranja površina difuzijom dušika u površinu predmeta. Ovo je jedan od najvažnijih postupaka koji se primjenjuje još od kraja 1920.-ih godina. Cilj nitriranja je dobiti visoku površinsku tvrdoću, poboljšati otpornost na trošenje i zamor, povećati otpornost na koroziju uz neznatne promjene dimenzija i oblika predmeta. Postupak se najčešće provodi u temperaturnom rasponu od 550 do 580 °C. Postoji tri vrste nitriranja: plinsko nitriranje, nitriranje u solnim kupkama i ionsko nitriranje. Pošto je plinsko nitriranje vremenski dug postupak (do 120 sati) i ima nedostatke poput loše kvalitete na zonama spajanja, nitriranje u solnim kupkama pružaju veću produktivnost te je jeftiniji postupak za serijsku proizvodnju. Ionsko nitriranje pruža mogućnosti preciznog optimiranja nitriranih slojeva, daje visoku čistoću obratka, postupak traje kraće za istu debljinu sloja u odnosu na prijašnje vrste, ali je postupak i skuplji [26].

Boriranje je postupak koji se temelji na difuziji bora u površinu predmeta. Kod ovog postupka predmeti moraju biti potpuno čisti prije obrade te se zagrijavaju u sredstvu za boriranje u temperaturnom rasponu od 700 do 1000 °C na 1 – 12 sati. Postupak se provodi u cilju postizanja visoke otpornost na abrazijsko i djelomično adhezijsko trošenje [17, 26].

## **4.2. Prevlačenje površina**

Prevlačenje površina su postupci kod kojih ne dolazi do promjene strukture površinskog sloja, već se na strojni dio nanosi tanki sloj nekog drugog materijala čime dolazi do promjena dimenzija elementa. Osnovna podjela prevlačenja površina je: toplinska, mehanička, toplinsko-mehanička, kemijska, elektrokemijska te iz parne faze.

### **4.2.1. Toplinska prevlačenja površine**

U toplinska prevlačenja površina se ubrajaju navarivanje i uranjanje u rastaljeni metal.

Navarivanje je postupak kod kojeg se na osnovni materijal nanosi dodatni u svrhu poboljšanja otpornosti na trošenje i koroziju, te zbog poboljšanja ili popravka istrošenih površina strojnih dijelova i alata. Oprema kojom se provode postupci navarivanja slična je opremi koja se koristi za postupke zavarivanja. Kako bi se dobio navareni sloj što veće kvalitete, odabire se postupak koji daje najmanji stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala. TIG navarivanje se koristi kod navarivanja malih površina i oštih rubova, REL postupak se koristi kod navarivanja malih do srednjih površina, a MIG/MAG i EPP postupci se koriste kod navarivanja velikih površina [17].



Uranjanje u rastaljeni metal je postupak kod kojeg se metalni predmeti uranjaju u rastaljeni metal koji mora imati znatno niže talište od obrađivanog predmeta, te se nakon vađenja skrućuje rastaljeni metal koji je ostao na obratku te se na taj način dobiva prevlaka. Ovim postupkom najčešće se obrađuju limovi, trake, žice, cijevi, ograde, dijelovi dalekovoda itd. Pošto vrijeme trajanja uranjanja predmeta u talinu traje kratko (do 10 minuta) ovaj postupak pruža veliku produktivnost. Prevlake koje se nanose se cink, kositar, olovo i aluminij. Nanošenje prevlaka cinka (cinčanje) je jedan od najznačajnijih postupaka kojim se zaštićuju konstrukcijski ugljični čelici i lijevano željezo od atmosferske korozije, a također daje i estetski prihvatljive prevlake. Prije same obrade predmet mora biti dobro očišćen [17].

#### **4.2.2. Mehaničko prevlačenje površina**

Kod mehaničkog prevlačenja površina dolazi do srastanja dva ili više materijala koja se nalaze u krutom stanju pomoću pritiska, topline ili zaštitne atmosfere. Ovi postupci još se nazivaju i deformacijsko spajanje, a mogu se podijeliti na spajanje valjanjem i eksplozijom.

Kod prevlačenja površina valjanjem spajaju se dva materijalu prolaskom kroz valjke. Idealno bi bilo kada bi oba materijala bila duktilna. Valjanjem obloženi materijali koriste se u rafinerijama, kemijskoj te petrokemijskoj industriji.

Prevlačenje eksplozijom se ostvaruje uslijed kontrolirane detonacije gdje dolazi do interakcije površina dvaju materijala. Ovime je moguće spajati cilindar s unutarnje i vanjske strane, kod spajanja cijevi za izmjenjivače topline te ravnih ploča [27].

#### **4.2.3. Toplinsko-mehanička prevlačenja površine**

U toplinsko-mehanička prevlačenja površine spadaju postupci naštrcavanja. Postupak se temelji na principu udaranja velikog broja čestica, na površinu predmeta koji se obrađuje, koje se u rastaljenom ili polurastaljenom stanju vežu na površinu raznim mehanizmima. Naštrcavanje se može podijeliti na četiri osnovna postupka:

- plinsko naštrcavanje
- elektrolučno naštrcavanje
- plazma naštrcavanje
- HVOF naštrcavanje [27].

Kod plinskog naštrcavanja koristi se dodatni materijal u obliku žice ili praška. Prašak se tali te se pomoću ekspandirajućih plinova plinskog plamena usmjerava na površinu materijala. Sitne kapljice poprimaju oblik kružnih diskova promjera do 0,1 mm i debljine do 0,05 mm. Ovakve prevlake su porozne u unutrašnjosti, a hrapave izvana pa je potrebna naknadna obrada. Kod naštrcavanja pomoću žice, žica se kontinuirano dovodi u plamenik gdje se na izlazu rastaljuje, a stlačeni zrak potiskuje rastaljenu kapljicu na površinu materijala [27].

Elektrolučno naštrcavanje je postupak kod kojeg se naštrcavaju samo električni vodljivi materijali. Dvije žice kao dodatni materijal se tale u električnom luku održavanom istosmjernom strujom te se usmjeravaju na površinu materijala. Ovim postupkom nanose se prevlake od cinka, aluminijske, bronce itd. Osnovni cilj ovog postupka je katodna zaštita materijala od korozije, ali i povećana otpornost na trošenje [17].

Kod plazma naštrcavanja električni luk se uspostavlja između W-elektrode i Cu-elektrode koja se hladi vodom. U izlaznu bakrenu mlaznicu dovodi se smjesa praška i inertnog plina te se zrnca praška naglo rastale i usmjeravaju na površinu obrađivanog predmeta. Ovo je jedan od najpopularnijih postupaka naštrcavanja zbog visoke energije i gustoće, a uglavnom se koristi za dobivanje tvrdih površina kod reparatura [17].

HVOF (eng. High Velocity Oxygen Fuel) naštrcavanje odlikuju prevlake odličnih mehaničkih svojstva te visoke sile vezanja. Ovaj proces razvijen je prije 20 godina, a izvodi se na način da u komori izgaraju smjese plinova (propan, propilen) ili tekućeg goriva, poput kerozina, pomiješanog s kisikom, te kroz posebnu konvergentno-divergentnu sapnicu usmjerava na površinu obratka. Ovaj postupak najčešće se koristi kao zamjena za tvrdo kromiranje pa se s toga koristi u zrakoplovnoj i vojnoj industriji gdje su materijali također izloženi i visokim temperaturama [27].

#### **4.2.4. Kemijsko prevlačenje površina**

Za prevlačenje površina kemijskim putem najčešće se koriste postupci fosfatiranja, bruniranja, kromiranja i sol-gel postupci.

Fosfatiranje je postupak nanošenja fosfatnih prevlaka na predmete izrađene od ugljičnog čelika, cinka ili aluminijske. Cilj fosfatiranja je poboljšati otpornost na atmosfersku koroziju, ali se također koristi i kao predobrada za lakiranje i bojanje. Prije provođenja fosfatiranja potrebno je površinu očistiti, a fosfatiranje se može vršiti uranjanjem u otopinu (npr. vijci) ili prskanjem (za velike i kompleksne predmete). Iako je sam postupak štetan za zdravlje i okoliš, i dalje ima svoju primjenu kod izrade vijaka, limenih ploča, klipova motora s unutarnjim izgaranjem, karoserije itd.

Za dobivanje prevlaka koriste se željezne, cinkove i manganske fosfatne prevlake, a masa nanesenog sloja može iznositi do  $50 \text{ g/m}^2$  podloge.

Bruniranje je postupak dobivanja tankih prevlaka najčešće crne ili tamne boje na površini čeličnih predmeta. Prevlaka se dobiva uranjanjem u kisele, alkalne ili otopine soli, a cilj je dobiti prevlaku magnetita koji poboljšava otpornost na atmosfersku koroziju i služi u dekorativne svrhe. Ova vrste obrade će se detaljnije objasniti u nastavku.

Kromatiranje je postupak kojim se obrađivanom predmetu poboljšava otpornost na koroziju, otpornost na trošenje te daje prevlaku dobrog sjaja. Za zaštitu od korozije koristi se dekorativno kromatiranje gdje se prevlake obično nanose na bakar, nikal, cink i mjed, a tvrde kromove prevlake se nanose na strojne dijelove koji su izloženi trošenju poput klipova, osovina, alata i sl. [17].

Sol-gel postupkom se dobivaju homogeni anorganski metalni oksidi željene tvrdoće, kemijske otpornosti, optičkih svojstava te toplinske otpornosti. Ovaj postupak se provodi u koloidnoj otopini (sol) i koloidnoj suspenziji tekućine u čvrstoj tvari (gel). Koloidna otopina sadrži homogenu suspendirane čestice malog promjera ( $1 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$ ), a gel je koloidna suspenzija tekućine u čvrstim tvarima. Ovaj postupak, u odnosu na druge postupke, odlikuje lakše deponiranje filmova odnosno prevlaka te lakša kontrola sastava i mikrostrukture prevlaka. Sol-gel postupci koriste se u proizvodnji oksidnih stakala, prahova, industrijskih optičkih vlakna, a postupak se koristi za zaštitu od korozije i plinske oksidacije [17].

#### **4.2.5. Elektrokemijsko prevlačenje površina**

U elektrokemijsko prevlačenje površina spada galvanizacija ili elektroplatanje. To je postupak nanošenja prevlaka s ciljem zaštite od korozije i trošenja trenjem. Zaštita od korozije temelji se na dva mehanizma. Prvi je katodna zaštita gdje nanosena prevlaka ima ulogu katode te štiti osnovni materijal, a drugi mehanizam je nastajanje prave mehaničke barijere. Metalna prevlaka može se postići jednostavnom elektrolizom vodene otopine koja sadrži željeni metalni ion ili njegov kompleks, a postupak se odvija pomoću vanjskog izvora struje između dviju elektroda pri čemu dolazi do anodne i katodne reakcije. Galvanske prevlake mogu biti monometalne (jednoslojne) poput nikla, bakra i srebra i polimetalne (višeslojne). Jedna od najvažnijih galvanskih prevlaka je prevlaka nikla. Ovakva prevlaka nudi dobru korozijsku zaštitu te pruža prevlaku lijepog estetskog izgleda i dobrih mehaničkih svojstava. Ovaj postupak se koristi u kemijskoj i prehrambenoj industriji te za reparaturu oštećenih strojnih dijelova [17].

#### **4.2.6. Prevlačenje površina iz parnih faza**

Postoje kemijski (CVD) i fizikalni (PVD) načini nanošenja prevlaka iz parnih faza. CVD postupak se temelji na kemijskom raspadu plinskih konstituenata i kemijskim reakcijama jednog ili više plinovitih spojeva s drugim plinovitim fazama kako bi se dobila prevlaka interakcijom tih smjesa plinova i zagrijane površine obrađivanog materijala. Osnove ovog postupka su poznate još od 1893. godine, ali se intenzivno počinje primjenjivati tek 1970.-tih godina. CVD postupak se najčešće koristi u svemirskoj i vojnoj industriji jer slojevi nastali ovim postupkom daju veću otpornost na trošenje, bolju otpornost na temperaturne promjene te duži vijek trajanja obrađenih predmeta (od 50 do 300 %). Kod PVD postupka se deponirani materijal iz čvrste faze prenosi u parnu fazu kroz vakuum ili plazmu na osnovni materijal gdje naknadno parna faza kondenzira u obliku prevlake. Za razliku od CVD, ovaj postupak je poznat tek 40 godina. Ovim prevlakama se povećava otpornost na trošenje, kemijska postojanost te sam izgled predmeta. Najčešće se koristi kod izrade alata, automobilskih dijelova, u tekstilnoj industriji, u medicini itd. [17].

## 5. Bruniranje

Bruniranje je kemijski postupak površinske obrade željeznih metala. Pošto ovaj način prevlačenja površina materijala daje prevlake koje velikim dijelom apsorbiraju svjetlo, koriste se kod obradbe oružja, alata, glazbenih instrumenata, odnosno na predmetima gdje se žele postići bolja vizualna svojstva. Kod bruniranja se na površini materijala stvara tanki sloj magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) koji štiti predmet od stvaranja neželjenog  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  odnosno hematita. Formirani sloj uz površinu metala sadrži FeO (vistit), a završni sloj sadrži  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  odnosno magnetit [10]. Iako bruniranje spada pod zaštitu materijala prevlačenjem površina, formirani sloj je vrlo tanak pa je bruniranje pogodno rješenje gdje je potrebna dimenzijska postojanost predmeta.



*Slika 5.1. Primjer čeličnih komada prije bruniranja (lijevo) i nakon (desno) [20]*

Postupku bruniranja se mogu podvrgnuti samo materijali na bazi željeza, odnosno u praksi najčešće čelici te željezni ljevovi s time da se ne mogu brunirati nehrđajući čelici. Iako brunirane prevlake pružaju određenu zaštitu protiv atmosfere korozije, vrlo često se impregniraju s uljem što omogućuje njihova prozna struktura čime se povećava efekt antikoroziivnosti.

### 5.1. Vrste bruniranja

Bruniranje se s obzirom na izvođenje procesa može podijeliti na dvije osnovne vrste:

- Toplo bruniranje
- Hladno bruniranje .

### 5.1.1. Toplo bruniranje

Toplo bruniranje je postupak kod kojeg se predmet brunira na način da se uranja u tople, odnosno vruće kupke koje mogu biti različitog sastava. U praksi toplo bruniranje daje najbolje rezultate, ali se ne može koristiti u svim prilikama. Ponekad će pojedini materijali prilikom povećanja temperature promijeniti svoju strukturu, a samim time i svoja uporabna svojstva, pa je stoga potrebno materijal obraditi na drugačiji način, odnosno hladnim bruniranjem. Iako se sam proces razlikuje od poduzeća do poduzeća te ovisi o samom materijalu i željenim rezultatima bruniranja, postupak se najčešće odvija prema sljedećem redoslijedu:

1. priprema predmeta
2. priprema kupke
3. bruniranje
4. neutralizacija
5. kontrola kvalitete

Na početku je potrebno očistiti predmet od prljavštine i masnoća kako bi se u potpunosti mogla odviti reakcija oksidacije odnosno bruniranja. Također se može i ispolirati površina ukoliko se npr. želi dobiti određena boja ili sjaj bruniranog sloja. Nakon toga je potrebno pripremiti kupku za toplo bruniranje. Postupak se izvodi u lužnatim, kiselim ili otopinama soli (što će se detaljnije objasniti u nastavku). Zatim se predmet uranja u kupku te se vrši proces bruniranja odnosno nastaje sloj  $Fe_3O_4$ . Proces neutralizacije najčešće uključuje čišćenje predmeta od produkta oksidativnih otopina koje se nalaze na predmetu nakon uranjanja u kupelji te se predmet suši. Ovaj proces se može ponoviti više puta ovisno o željenim rezultatima. Na kraju se provodi kontrola kvalitete bruniranog predmeta gdje se ispituje debljina same prevlake koja utječe na impregnaciju s uljem te samim time i poboljšanu zaštitu od korozije. Provjera se također odvija i vizualno, odnosno zadovoljava li prevlaka željenu boju ili se provjerava da nije došlo do ljuštenja same prevlake.

#### 5.1.1.1 Vrste kupelji za toplo bruniranje

Postupak toplog bruniranja izvodi se u lužnatim, kiselim ili otopinama soli. Iako se, kao što je već spomenuto, sam sastav kupelji može razlikovati te je često i poslovna tajna generalno se slijede određena pravila kakva će se opisati u nastavku.

Bruniranje u lužnatim otopinama jedan je od najčešćih postupaka. On se provodi u vrelin koncentriranim otopinama natrijevog hidroksida (NaOH) koji sadrži oksidanse poput nitrata i

nitrita. Nakon toga slijedi čišćenje predmeta te se suhi predmet uranja u toplu kupelj temperature 135-145 °C gdje se ostavlja od 10 do 30 minuta i nastaje brunirani sloj odnosno magnetit debljine do 2 mikrometara [17].

Sljedeća vrsta kupelji za toplo bruniranje su kupelji otopina soli. Na tržištu postoji više proizvođača otopina soli koje se koriste za ovakav proces, ali sve će sadržavati  $\text{KNO}_3$  (kalijev nitrat),  $\text{NaNO}_2$  (natrijev nitrit) i  $\text{NaNO}_3$  (natrijev nitrat). Ovo je relativno jeftina metoda bruniranja kojom se mogu dobiti prevlake različitih boja poput plave, ljubičaste, žute ili smeđe.

Na boju prevlake utječe priprema površine, temperatura otopine, sama vrsta čelika te vrijeme izlaganja predmeta u kupelji. Ispolirana površina će imati svjetliju i sjajniju boju prevlake, dok će grublje površine biti nešto tamnije i mat boje. Npr., ako bi se željela dobiti plava boja (slika 5.2.), otopinu soli je potrebno zagrijati na 140 – 160 °C, dok se za žutu ili smeđu boju savjetuje temperatura 260 – 290 °C. Ukoliko se želi dobiti mat boja, površina se može prije bruniranja uroniti u željezov klorid ( $\text{FeCl}_3$ ). Na boju će također utjecati debljina prevlake, odnosno vrijeme izlaganja predmeta u otopini.

Prije početka bruniranja, predmet je potrebno dobro očistiti i odmastiti. U suprotnom će doći do ljuštenja prevlake nakon bruniranja. Zatim se predmet može uroniti u otopinu gdje se ostavlja nekoliko minuta (ovisno o željenim rezultatima). Prilikom ovog postupka, predmet je potrebno svako malo izvaditi i provjeravati boju prevlake koju predmet dobiva sve dok se ne dobije željena boja. Nakon što se predmet izvadi iz kupelji, poželjno ga je odmah ugasiti u vodi kako bi se zaustavio proces bruniranja. Nakon toga je predmet potrebno dobro očistiti i posušiti kako soli ne bi reagirale u doticaju s drugim elementima (u slučaju da se predmet sklapa u neku konstrukciju). Na kraju se predlaže predmet impregnirati s uljem kako bi se poboljšala otpornost na koroziju. Jedina mana koju bruniranje u otopinama soli ima je ta da nastala prevlaka nije otporna na abrazijsko trošenje pa će se s vremenom prevlaka istrošiti.

Prednost ovog postupka je da ukoliko se ne dobije željeni rezultat, predmetu se može skinuti prevlaka, te se predmet ponovno pripremi i postupak se može ponoviti.

Ovakva vrsta bruniranja se može izvoditi i kod kuće pa je prilikom izvođenja ovog procesa bitno pridržavati se mjera opreza te nositi zaštitnu opremu pošto otopine soli imaju vrlo štetan učinak u doticaju s kožom [21].



*Slika 5.2. Prikaz predmeta plave prevlake dobivene bruniranjem u otopini soli [21]*

Kod procesa bruniranja se još koriste i kisele otopine. Kisele otopine se rijetko koriste, a najčešće se koristi kod tzv. „korozijskog bruniranja“ (eng. Rust bluing). Ovakva vrsta bruniranja se najčešće koristi kod bruniranja oružja. Ova metoda nastala je u 19. stoljeću, prije razvoja modernijih postupaka toplog bruniranja. Češće se koristila u prošlosti nego danas, ali još uvijek ima svoju primjenu, a najčešće kod restauracije starih oružja ili antikviteta. Bruniranjem koristeći kisele otopine mogu se dobiti prevlake sive, smeđe ili crne boje.

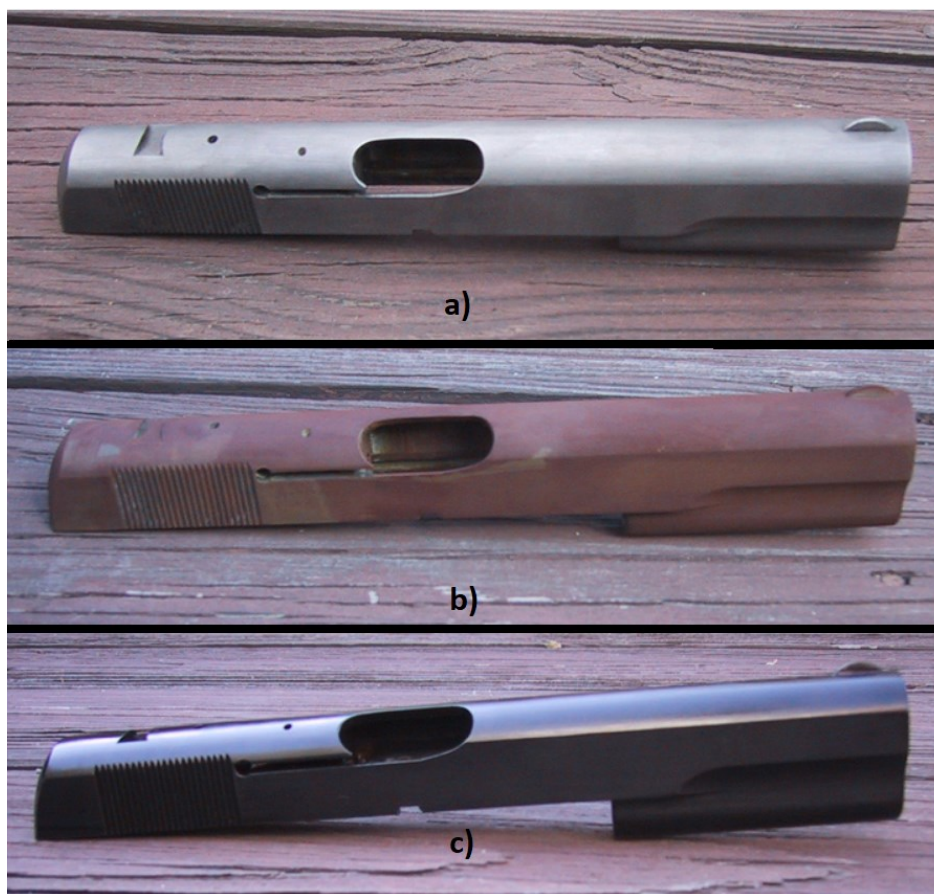
Proces se izvodi na način da se površina prvo pripremi, namaže kemikalijama te se uroni u kipuću vodu. Prednost ovog postupka u odnosu na ostale vrste toplog bruniranja je ta da je temperatura kupke 100 °C što je vrlo pogodno jer na 100 °C kod čelika još uvijek ne dolazi do značajnih promjena u strukturi pa ne mijenja svoja svojstva. Također je sigurnija za predmete koji imaju lemljene dijelove jer kod bruniranja u lužnatim kupkama dolazi do rastvaranja lema što može uzrokovati raspadanjem konstrukcije i/ili se može stvoriti nakupina „bjele mase“ što je zapravo kristalizirana natrijeva lužina koja nastaje radi nedovoljnog ispiranja nakon bruniranja [22].

Kod ovog postupka se ne može dobiti sjajan izgled prevlake, kao kod npr. bruniranja u otopinama soli, već prevlake nešto veće hrapavost. U prošlosti su se za premaz koristile različite toksične kemikalije poput  $\text{HgCl}_2$ , ali danas se preferira upotreba manje toksičnih kemikalija.

Prvo se predmet mora dobro očistiti i odmastiti npr. s acetonom. Nakon toga se pamučna krpica natopi s premazom za bruniranje te se razmaže po površini predmeta. Nakon toga se treba pričekati da predmet oksidira. Da bi se ubrzao proces oksidacije, predmet se, nakon premaza za bruniranje, može premazati s vodikovim peroksidom ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) što će odmah izazvati stvaranje oksida odnosno  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ovo je i praktičnije rješenje jer se lakše postiže jednoličan sloj oksida na cijeloj površini.



Nakon toga se predmet treba obrisati te uroniti u kipuću vodu na otprilike 15 minuta. Predmet se zatim izvadi, osuši te se očisti finom čeličnom četkom kojom se skinu korozijski produkti koji slabo prijanjaju, a na površini će ostati samo čvrsto prijanjajući novonastali sloj magnetita. Ovaj proces se ponavlja nekoliko puta, ovisno o željenoj debljini i boji prevlake. Ukoliko se umjesto nanošenja  $H_2O_2$  predmet ostavi na zraku da korodira prirodnim putem, bit će potreban manji broj ponavljanja postupka za isti rezultat, ali će se također znatno povećati i samo vrijeme ukupnog trajanja ovakvog procesa bruniranja. Na kraju se preporučuje površinu na tanko premazati s uljem kako bi se znatno povećala otpornost na koroziju. Ovaj postupak najčešće se izvodi kao „home made“ pa se premazi za izazivanje oksidacije rade s kiselim tvarima poput  $ZnCl_2$ ,  $NH_4Cl$ ,  $HCl$ , i destilirane vode. Također, premaz se može napraviti koristeći  $H_2O_2$  i kuhinjsku sol [23].



Slika 5.3. Prikaz kliznog dijela mehanizma za okidanje pištolja Husqvarna 1907 [24]

Na slici 5.3. mogu se vidjeti faze „rust“ bruniranja. Pod a) je prikazan klizni dio mehanizma za okidanje koji je očišćen i pripremljena za daljnje faze. Pod b) se vidi oksidirani dio, a pod c) je završeni dio sa magnetitnom prevlakom.

„Rust“ bruniranje daje prevlake koje su najotpornije i dugotrajnije na trošenja i koroziju, ali se zbog dugog trajanja samog procesa koji ponekad može biti i do 3 dana, ne koristi prilikom izrade

modernih oružja već kod restauracije starih oružja i antikviteta. Kod izrade modernih oružja koriste se postupci bruniranja u kupeljima lužnatih otopina [25].

### 5.1.2. Hladno bruniranje

Glavna prednost hladnog bruniranja je ta da prilikom izvođenja procesa ne dolazi do toplinskog zagrijavanja predmeta čime se postiže dimenzijska stabilnost. Hladno bruniranje se također koristi i kod kućnih postupaka bruniranja upravo radi svoje jednostavnosti i brzine postupka.

Postupak se temelji na premazivanju obratka sa sredstvom za bruniranje (slika 5.4.). Najprije je obradak potrebno očistiti i odmastiti jer u suprotnom sredstvo za bruniranje neće imati svoj efekt. Potom se obradak premaže ili uroni u otopini za bruniranje gdje se trenutno stvori crna prevlaka. Predmet se zatim očisti od preostale tekućine za bruniranje u hladnoj vodi i osuši, te se impregnira s uljem i ostavi da tako odstoji od 12 do 24 sata. Predmet se nakon toga može očistiti od viška ulja te je proces završen [20].



*Slika 5.4. Primjer sredstva za hladno bruniranje [28]*

Ovaj postupak vrlo je praktičan u slučaju kada se trebaju brunirati vrlo tanki predmeti jer se ne trebaju zagrijavati pa samim time ne dolazi do deformacije predmeta. Ponekad uslijed visokih temperatura kod provođenja toplog bruniranja predmeta dolazi do promjene u strukturi pa se mora koristiti hladno bruniranje. Također koristi se kada radi veličine obratka nije praktično provesti toplo bruniranje, odnosno uroniti predmet u kupelj.

## 6. Praktični dio

U sklopu praktičnog dijela proveden je eksperiment toplog bruniranja zagrijavanjem i uranjanjem u motorno ulje ispitnih uzoraka od dva različita čelika, te analiza rezultata na mikroskopu s ciljem pokazivanja nastalog formiranog magnetitnog, odnosno bruniranog sloja na različitim vrstama čelika, različite debljine.

### 6.1. Ispitni uzorci

Za provođenje eksperimenta korištene su dvije čelične pločice (slika 6.1.). Uzorak 1 je pločica od općeg konstrukcijskog čelika S235JR, dimenzija 10 mm x 58 mm x 90 mm, a uzorak 2 je pločica od čelika za poboljšavanje 25CrMo4, dimenzija 4 mm x 54 mm x 90 mm.



*Slika 6.1. Ispitni uzorci prije provođenja eksperimenta*

### 6.2. Svojstva ispitnih uzoraka

Čelik S235JR je često korišten čelik u mnogim konstrukcijskim primjenama poput visokogradnje, mostova, strojeva, spremnika i različitim metalnim konstrukcijama poput skela ili telekomunikacijskih tornjeva, zbog svojih dobrih mehaničkih svojstva koja su prikazana u tablici 6.1. Također je i vrlo lako zavarljiv što doprinosi njegovoj rasprostranjenosti [29].

Tablica 6.1. Mehanička svojstva čelika S235JR [29]

Vlačna čvrstoća	360 – 510 MPa
Granica razvlačenja	235 MPa
Istezanje	26%
Tvrdoća	104 – 154HB
Modul elastičnosti	210 GPa

Čelik za poboljšavanje 25CrMo4 koristi se kod izrade dijelovi za rad pri visokim temperaturama poput lopatica turbina, radilica, vijka, matica, šasija itd. Ovaj čelik je također dobro zavarljiv te ima dobru duktilnost. Kemijski sastav ovog čelika prikazan je u tablici 6.2. [30].

Tablica 6.2. Kemijski sastav čelika 25CrMo4 [31]

C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si
0.22-0.29%	0.9-1.2%	0.6-0.9%	0.15-0.3%	do 0.035%	do 0.035%	do 0.4%

### 6.3. Oprema za provođenja eksperimenta

Kako bi se eksperiment mogao uspješno provesti, potrebna je određena oprema. Prilikom provođenja eksperimenta, uzorci su se kontaktnim putem zagrijavali na bakrenoj ploči koja je stavljena na izvor topline kako bi se postiglo bolje i jednoličnije zagrijavanje ispitnih uzoraka. Za mjerenje temperature ispitnih uzoraka korišten je mjerni instrument SKF infrared thermometer TKTL 20 koji je prikazan na slici 6.2.



Slika 6.2. SKF infrared thermometer TKTL 20 [32]

Osnovne specifikacije mjernog instrumenta prikazane su u tablici 6.3.

*Tablica 6.3. Osnovne specifikacije SKF TKTL 20 termometra*

Toplinski raspon mjerenja beskontaktno	Od -60 do +625 °C
Toplinski raspon mjerenja kontaktnim putem	Od -64 do +1400 °C
Vrijeme odziva	<1 000 ms
D:S	16:1

Hlađenje mjernih uzoraka provedeno je u motornom ulju TOTAL Quartz INEO ECS 5W-30. Specifikacije ulja prikazane se u tablici 6.4. [33]

*Tablica 6.4. Specifikacije ulja*

Stupanj viskoznosti	5W-30
Viskoznost pri 40°C	56,3 mm <sup>2</sup> /s
Viskoznost pri 100°C	10,1 mm <sup>2</sup> /s
Indeks viskoznosti	168
Točka tečenja	-39°C

Za analizu uzoraka korišten je mikroskop Olympus GX53 (slika 6.3.), koji je namijenjen isključivo za upotrebu u metalurgiji.



*Slika 6.3. Mikroskop Olympus GX53 [34]*

#### 6.4. Prvi test

Kod izvođenja eksperimenta prvi puta, određeno je da temperatura predgrijanja obiju pločica iznosi 165 °C. Tijekom zagrijavanja, temperatura se mjerila kontaktnim putem sve dok se nije postigla temperatura predgrijanja od 165 °C kako je prikazano na slici 6.4.



*Slika 6.4. Mjerenje temperatura pločica prilikom njihovog zagrijavanja*

Nakon što su pločice postigle željenu temperaturu, uronile su se u ulje te ostavile da odstoje tako nekoliko minuta (slika 6.5.)



*Slika 6.5. Hlađenje pločica u ulju*

Nakon nekoliko minuta pločice su se izvadile iz ulja te se obrisale krpom kako bi se očistile i posušile. Vizualnom provjerom pločica zaključilo se da postupak nije dao nikakve rezultate, odnosno nije došlo do stvaranja magnetitnog sloja na pločicama, pa je proveden i drugi test.

## 6.5. Drugi test

Pošto prilikom izvođenja eksperimenta prvog puta nije došlo do stvaranja bruniranog sloja na ispitnim uzorcima, proveden je i drugi test kod kojeg je, za razliku od prvog testa, temperatura predgrijavanja iznosila 300 °C. Kao i prvog puta, pločice su se stavile na izvor topline te su se zagrijavale sve do kad mjerni instrument nije pokazao 300 °C (slika 6.6.).



*Slika 6.6. Zagrijavanje pločica na temepraturu od 300 °C*

Nakon postizanja temeprature od 300 °C, pločice su se ponovo uronile u ulje te ostavile tako da odstoje nekoliko minuta (slika 6.7.).



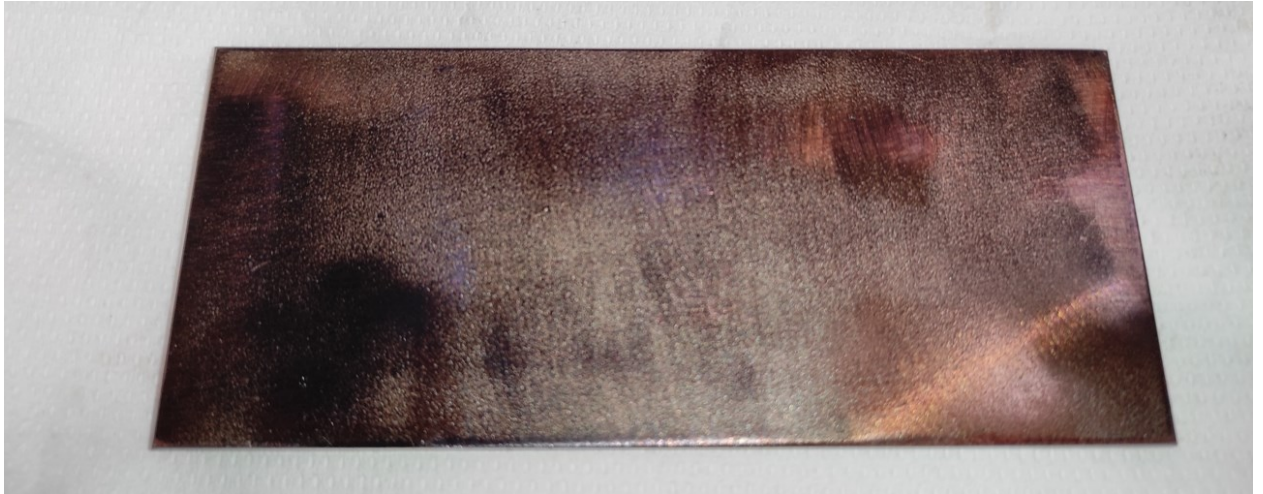
*Slika 6.7. uranjanje zagrijane pločice u ulje*

Nakon nekoliko minuta pločice su se izvadile te se obrisale i očistile krpom. Ovog puta došlo je do stvaranja bruniranog sloja na obje pločice što je prikazano na slikama 6.8. i 6.9.



*Slika 6.8. Prikaz brunirane pločice S235JR*





*Slika 6.9. Prikaz brunirane pločice 25CrMo4*

## 7. Analiza rezultata

Pošto je nakon provođenja eksperimenta došlo do formiranja bruniranog sloja na čeličnim pločicama, one su se podvrgnule analizi na mikroskopu.

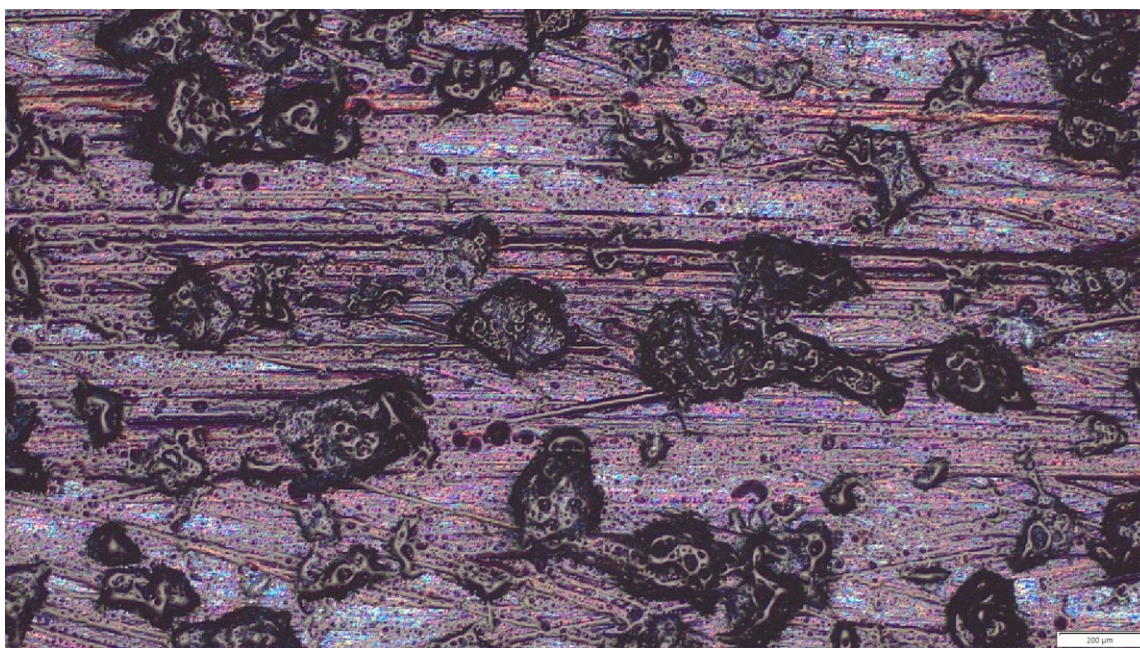
### 7.1. Analiza pločice S235JR

Prvo se analizirala pločica S235JR. Pločica se analizirala na dva mjesta. Prvo na mjestu gdje je došlo do stvaranja većeg formiranja sloja, što je na slici 7.1. zaokruženo mjesto broj jedan, a potom na mjestu gdje je formirani sloj manji, što je na slici 7.1. zaokruženo mjesto broj dva.



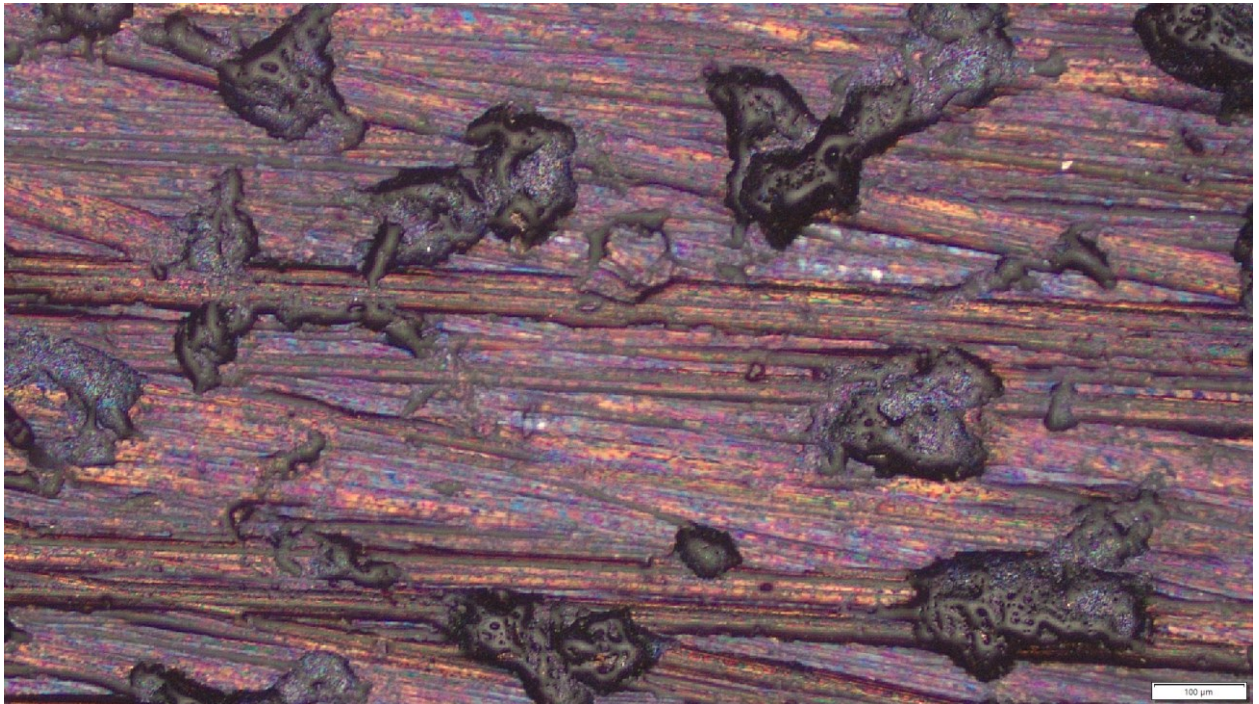
*Slika 7.1. Oznaka mjesta promatranja na mikroskopu*

Kod promatranja prvog mjesta, prvo se pomoću mikroskopa pločica uvećala za 50 puta, što je prikazano na slici 7.2. Ovdje se može vidjeti da je došlo do formiranja bruniranog sloja, ali ne u potpunosti.

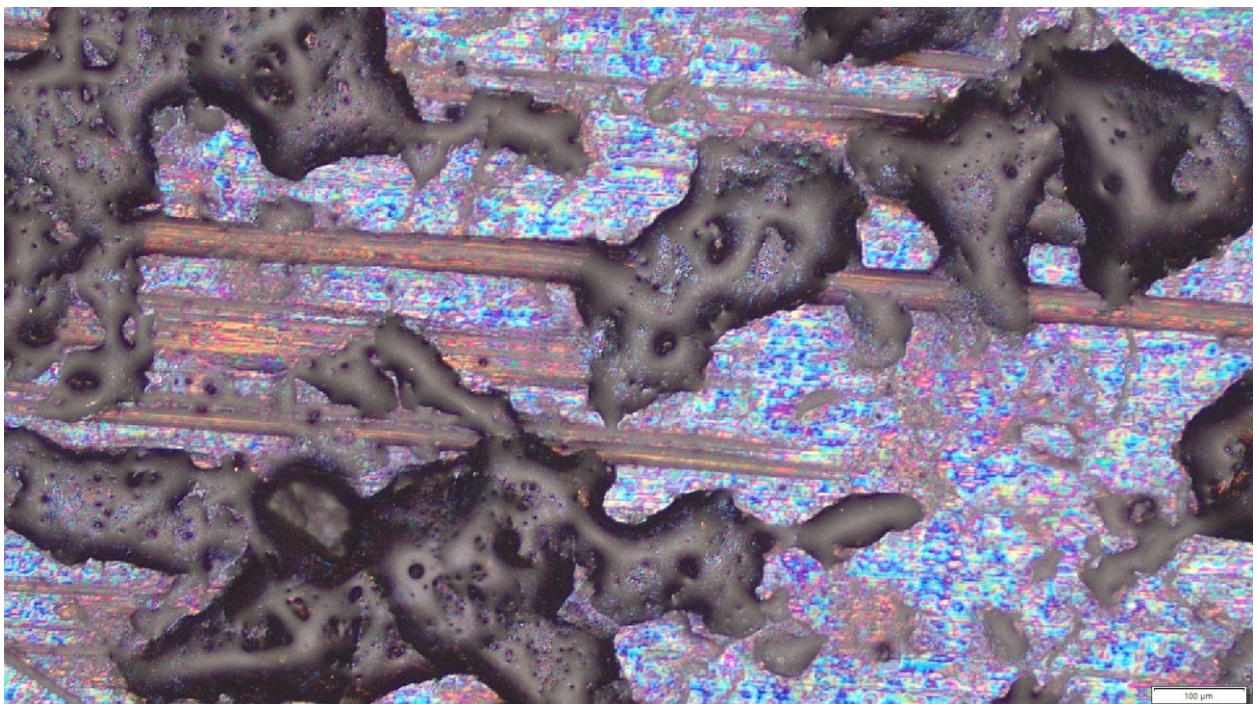


*Slika 7.2. Povećanje x50 pločice S235JR na zaokruženom mjestu broj jedan*

Povećanjem istog mjesta na mikroskopu za 100 puta, može se zornije vidjeti magnetit formiran na površini (slike 7.3. i 7.4.).

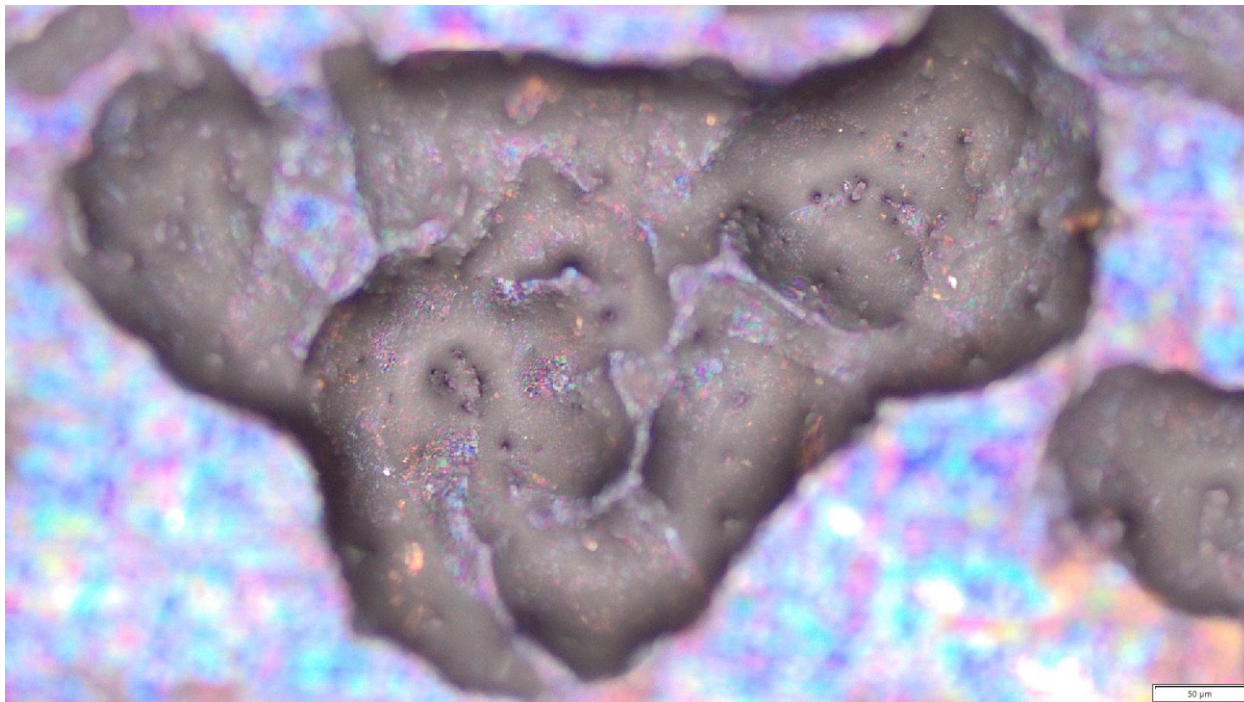


*Slika 7.3. Uvećanje pločice S235JR 100 puta*



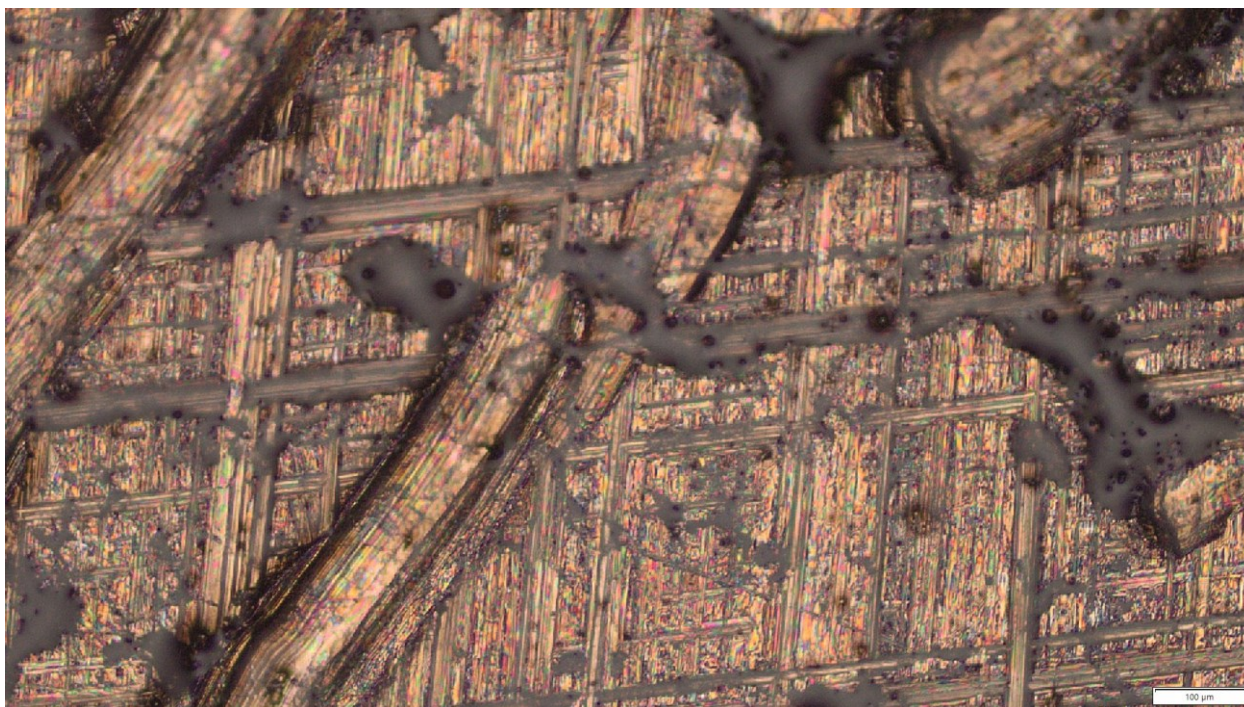
*Slika 7.4. Uvećanje pločice S235JR 100 puta*

Na kraju se uzorak pomoću mikroskopa uvećao 200 puta što prikazuje slika 7.5.



*Slika 7.5. Uvećanje pločice S235JR 200 puta*

Na slici 7.6. prikazano je drugo mjesto promatranja kao što je to označeno na slici 7.1. Može se vidjeti da je brunirani sloj puno manji.



*Slika 7.6. Uvećanje pločice S235JR x100 manje bruniranog mjesta na pločici*

Iz priloženog se može zaključiti kako je došlo do stvaranja bruniranog sloja, ali ne u potpunosti. Na nekim mjestima je pločica više brunirana, a na nekima manje. Ako bi se želio dobiti potpuno brunirani sloj, pločice bi se trebale zagrijati na temperaturu veću od 300 °C te bi se postupak eventualno mogao ponoviti više puta sve do kad se ne dobije željeni rezultat.

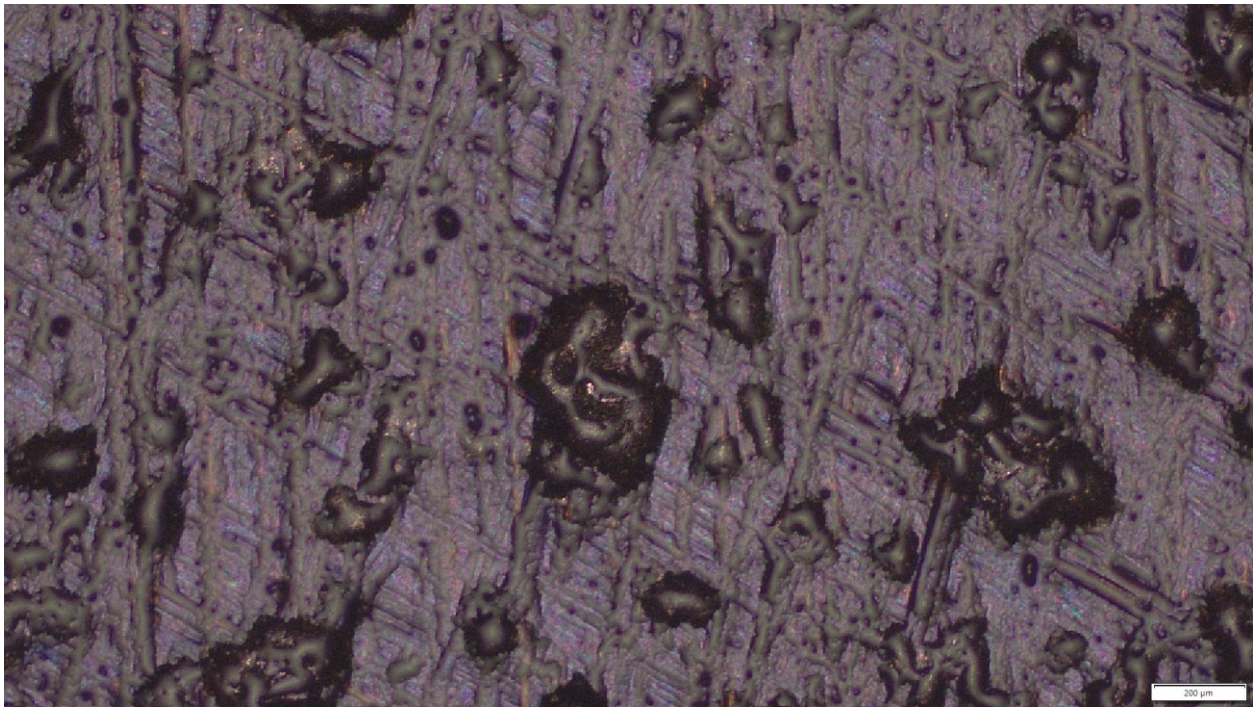
## 7.2. Analiza pločice 25CrMo4

Pločica 25CrMo4 također je bila podvrgnuta analizi pod mikroskopom. Ona se promatrala na zaokruženom mjestu kao što je prikazano na slici 7.7.



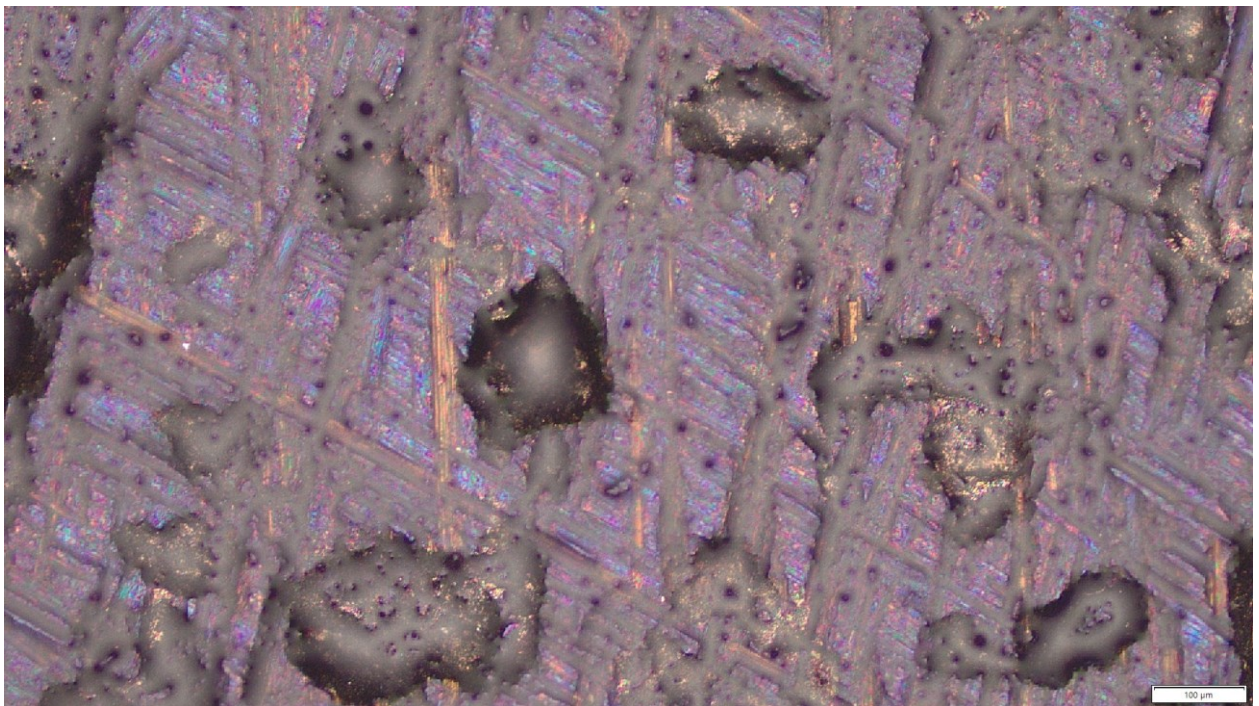
*Slika 7.7. Označeno mjesto promatranja na mikroskopu*

Pločica se prvo povećala 50 puta te se može vidjeti kako je i na ovoj pločici došlo do stvaranja magnetitnog sloja (slika 7.7.).

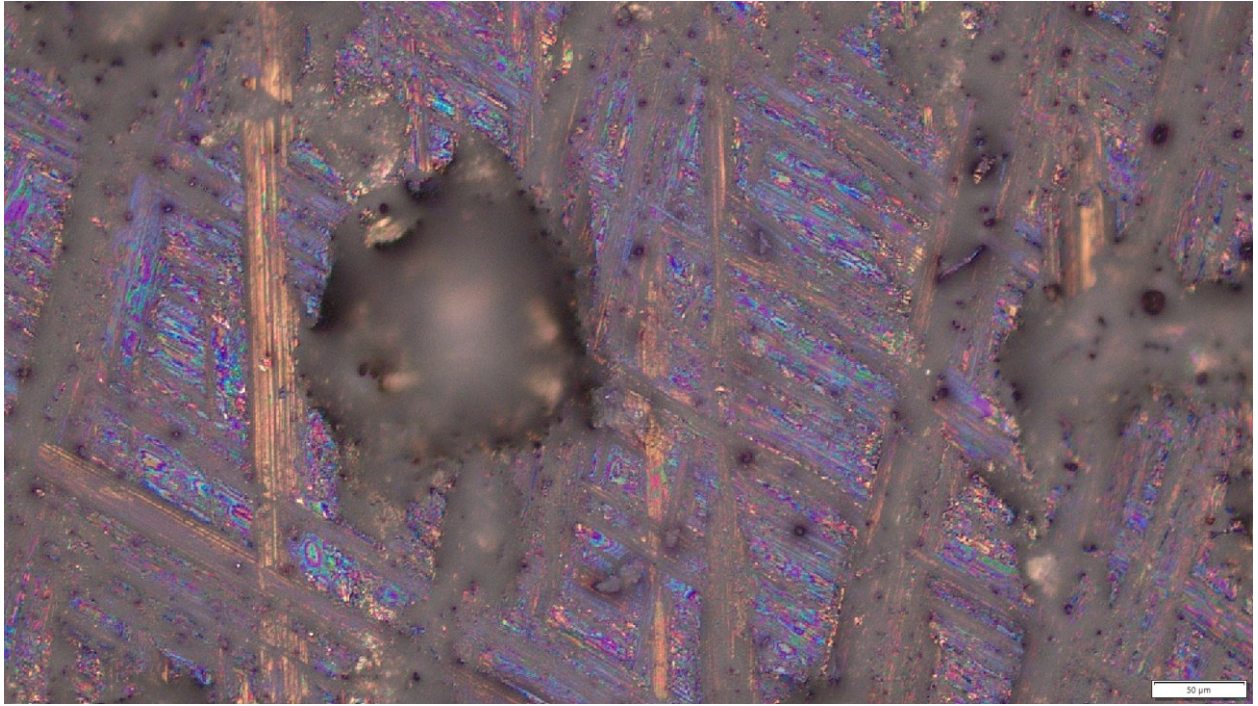


*Slika 7.8. Uvećanje pločice 25CrMo5 50 puta*

Uvećanjem 100 i 200 puta može se vidjeti kako je došlo i do umrežavanja, ali je stvoreni magnetit manji u odnosu na prijašnju S235JR pločicu.



*Slika 7.9. Uvećanje pločice 25CrMo5 100 puta*



*Slika 7.10. Uvećanje pločice 25CrMo5 200 puta*

Iz priloženog se vidi kako je i na ovoj pločici došlo do formiranja bruniranog sloja, ali nešto slabije u odnosu na pločicu S235JR. Razlog tomu leži i u temperaturi površine pločice prije podvrgavanju postupku hlađenja, ali i o kemijskom sastavu pločice. Baš kao i kod pločice S235JR, bolje formiranje magnetita će se ostvariti povećanjem temperature predgrijanja.

## 8. Zaključak

Pošto korozija i trošenje materijala uzrokuju velike probleme u strojarstvu i nažalost, neizbježni su procesi, od velike je važnosti proučavati načine kojima se može usporiti ili zaustaviti njihovo djelovanje. Inženjerstvo površina pruža nam razumijevanje o načinima površinske zaštite materijala te koje metode se kada primjenjuju. Osim zaštite od korozije i trošenja materijala, bitno je ispuniti i vizualne zahtjeve materijala i konstrukcija. Jedan od načina ispunjenja ovog zahtjeva je postupak bruniranja.

Bruniranje je postupak prilikom kojeg dolazi do formiranja magnetitnog sloja na površini materijala. Svoju najveću primjenu ima kod površinske obrade vatrenih oružja pošto se može ostvariti sloj crne, mat boje. Provođenjem eksperimenta toplog bruniranja, te analizom ispitnih uzoraka pod mikroskopom zaključeno je kako se intenzitet formiranja sloja može razlikovati na što utječe temperatura površine te kemijski sastav materijala.





### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, KARLO MEŠTRIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/~~ica~~ završnog/~~diplomskog~~ (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom POSTUPAK BRUMARNA KORISTENJEM ULJA ZA MOTORE (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/~~ica~~ KARLO MEŠTRIĆ  
(upisati ime i prezime)

Karlo Meštrić  
(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## 9. Literatura

- [1] M. Horvat: Korozija i zaštita, predavanja iz kolegija „Tehnologija III“
- [2] <https://www.oldcolt.com/products/colt-m1911-45acp-sn-345795-mfg-1918-commercial-military> , dostupno 16.7.2023.
- [3] M. Bušić: Kemijski i elektrokemijski postupci prevlačenja površina, predavanja iz kolegija „Površinska obrada materijala“
- [4] E. McCafferty: Introduction to Corrosion Science, Springer New York, NY, 2010.
- [5] <http://35wbridge.pbworks.com/w/page/900751/Silver%20Bridge%20Collapse>,dostupno 16.7.2023.
- [6] V. Alar: Kemijska postojanost metala, FSB, 2015.
- [7] <https://www.hausjournal.net/korrosion-von-eisen>, dostupno 16.7.2023.
- [8] <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-020-01097-0>, dostupno 16.7.2023.
- [9] [https://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/pitting\\_corrosion.htm](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/pitting_corrosion.htm),dostupno 16.7.2023
- [10] I. Andrić: Korozija i zaštita od korozije poljoprivredne tehnike, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2017.
- [11] <https://www.paluba.info/smf/index.php?topic=9767.0>, dostupno 16.7.2023.
- [12] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrokemijska\\_korozija#/media/Datoteka:Rust\\_Bolt.JPG](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrokemijska_korozija#/media/Datoteka:Rust_Bolt.JPG), dostupno 16.7.2023.
- [13] K. Grilec, V. Ivušić: Tribologija, Autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2011.
- [14] A.D. Jelenski: Utjecaj parametara precipitacijskog očvrnuća na abrazijsku otpornost aluminijske legure, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2019
- [15] M. Horvat: Tehnike spajanja, predavanja iz kolegija „Tehnike spajanja“
- [16] T. Žnidarec: Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2009.
- [17] M. Gojić: Površinska obradba materijala, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Sisak, 2010.

- [18] <http://dusan.sts.si/povrsinsko-kaljenje-m561/>, dostupno 16.7.2023.
- [19] <https://www.ferometal.hr/bruniranje>, dostupno 4.5.2023.
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=5Sty5upsadY>, dostupno 6.5.2023.
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=8LzuBLhGiqM>, dostupno 6.5.2023.
- [22] <https://www.lovac.info/lovacko-oruzje-optika-lov/lovacko-oruzje-za-lov/1114-puskar-rusan-stete-od-nestrucnog-bruniranja.html>, dostupno 7.5.2023.
- [23] <https://www.youtube.com/watch?v=4OhhBIN1Odw>, dostupno 7.5.2023.
- [24] <https://www.newphillysports.com/RustBlue.html>, dostupno 11.5.2023.
- [25] <https://ribstonegunsmithing.ca/rustBlue.php>, dostupno 11.5.2023.
- [26] S.Šolić: Površinska obrada materijala, predavanja iz kolegija „Površinska obrada materijala“
- [27] M. Bušić: Toplinsko naštrcavanje, navarivanje, predavanja iz kolegija „Površinska obrada materijala“
- [28] <https://ballistol.de/produkte/technik/waffenpflege/72/schnellbruenierung>, dostupno 16.7.2023.
- [29] <https://italfaber.it/hr/karakteristike-%C4%8Delika-s235jr%2C-svojtva-i-upotreba/>, dostupno 9.9.2023.
- [30] <https://virgamet.com/25hm-25crmo4-1-7218-24crmo5-20crmo4-sae-aisi-4130-alloy-steel>, dsotupno 9.9.2023.
- [31] [https://www.tachart.com/material/25crmo4/?gclid=CjwKCAjwr\\_CnBhA0EiwAci5sirV2hdGGTbhCO2VCx-ZnC-CVnEXnFAh7RzToy\\_N5fcDhrAxoAHz4fhoCIpoQAvD\\_BwE](https://www.tachart.com/material/25crmo4/?gclid=CjwKCAjwr_CnBhA0EiwAci5sirV2hdGGTbhCO2VCx-ZnC-CVnEXnFAh7RzToy_N5fcDhrAxoAHz4fhoCIpoQAvD_BwE), dostupno 9.9.2023.
- [32] <https://indometer.co.id/SKF-TKTL-20>, dostupno 5.9.2023.
- [33] [https://totalenergies.com.au/system/files/atoms/files/tds\\_total\\_quartz\\_ineo\\_ecs\\_5w-30\\_lkx\\_202009\\_en.pdf](https://totalenergies.com.au/system/files/atoms/files/tds_total_quartz_ineo_ecs_5w-30_lkx_202009_en.pdf), dostupno 7.9.2023
- [34] <https://spectrographic.co.uk/products/olympus-gx53-inverted-microscope>, dostupno 9.9.2023.

## Popis slika

Slika 1.1. Prikaz bruniranog pištolja [2].....	1
Slika 2.1. Srušeni most „Silver Brigde“ u Ohio-u [5].....	3
Slika 2.2. Prikaz klasifikacije korozijskih procesa.....	5
Slika 2.3. Stvaranje slojeva oksida na površini čelika u vrućem zraku [6].....	7
Slika 2.4. Prikaz rasta oksidnog sloja [6].....	7
Slika 2.5. Prikaz opće korozije [7].....	9
Slika 2.6. Primjer grafitizacije na cijevi od lijevanog željeza [8].....	11
Slika 2.7. Prikaz pjegaste korozije [1].....	12
Slika 2.8. Pojavni oblici rupičaste (pitting) korozije [9].....	13
Slika 2.9. Prikaz potpovršinske korozije [11].....	14
Slika 2.10. Prikaz galvanske korozije između vijka i matice [12].....	15
Slika 3.1. Jedinični događaj abrazije u dvije faze [13].....	17
Slika 3.2. Abrazija s dva (a) i tri (b) tijela [13].....	18
Slika 3.3. Proces adhezije u tri faze [13].....	19
Slika 3.4. Faze odvijanja umora površine [13].....	20
Slika 3.5. Faze tribokorozije [13].....	21
Slika 4.1. Prikaz površinskog kaljenja [18].....	25
Slika 5.1. Primjer čeličnih komada prije bruniranja (lijevo) i nakon (desno) [20].....	32
Slika 5.2. Prikaz predmeta plave prevlake dobivene bruniranjem u otopini soli [21].....	35
Slika 5.3. Prikaz kliznog dijela mehanizma za okidanje pištolja Husqvarna 1907 [24].....	36
Slika 5.4. Primjer sredstva za hladno bruniranje [28].....	37
Slika 6.1. Ispitni uzorci prije provođenja eksperimenta.....	38
Slika 6.2. SKF infrared thermometer TKTL 20 [32].....	39
Slika 6.3. Mikroskop Olympus GX53 [34].....	40
Slika 6.4. Mjerenje temperatura pločica prilikom njihovog zagrijavanja.....	41
Slika 6.5. Hlađenje pločica u ulju.....	41
Slika 6.6. Zagrijavanje pločica na temperaturu od 300 °C.....	42
Slika 6.7. uranjanje zagrijane pločice u ulje.....	43
Slika 6.8. Prikaz brunirane pločice S235JR.....	43
Slika 6.9. Prikaz brunirane pločice 25CrMo4.....	44
Slika 7.1. Označena mjesta promatranja na mikroskopu.....	45
Slika 7.2. Povećanje x5 pločice S235JR na zaokruženom mjestu broj jedan.....	45
Slika 7.3. Uvećanje pločice S235JR 10 puta.....	46

Slika 7.4. Uvećanje pločice S235JR 10 puta .....	46
Slika 7.5. Uvećanje pločice S235JR 20 puta.....	47
Slika 7.6. Uvećanje pločice S235JR x5 manje bruniranog mjesta na pločici.....	47
Slika 7.7. Označeno mjesto promatranja na mikroskopu.....	48
Slika 7.8. Uvećanje pločice 25CrMo5 pet puta.....	49
Slika 7.9. Uvećanje pločice 25CrMo5 deset puta.....	49
Slika 7.10. Uvećanje pločice 25CrMo5 20 puta.....	50

## **Popis tablica**

Tablica 2.1. Upotrebljivost materijala s obzirom na prosječnu brzinu prodiranja korozije [6].....	10
Tablica 6.1. Mehanička svojstva čelika S235JR [29].....	39
Tablica 6.2. Kemijski sastav čelika 25CrMo4 [31].....	39
Tablica 6.3. Osnovne specifikacije SKF TKTL 20 termometra.....	40
Tablica 6.4. Specifikacije ulja.....	40