

# Povećanje otpornosti na trošenje vinogradarskih škara primjenom postupaka modificiranja površina

---

**Novosel, Karlo Juraj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:492218>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karlo Juraj Novosel**

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Karlo Juraj Novosel

Zagreb, 2024. godina.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno uz pomoć prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing., koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje koristeći navedenu literaturu i rezultate dobivene u eksperimentalnom dijelu.

Posebne zahvale idu mentoru prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing. na stručnoj pomoći tijekom izrade rada te na strpljenju, zalaganju i pristupačnosti.

Karlo Juraj Novosel



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Juraj Novosel** JMBAG: **0035229187**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Povećanje otpornosti na trošenje vinogradarskih škara primjenom postupaka modificiranja površina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Increasing the wear resistance of vineyard shears by applying surface modification procedures**

Opis zadatka:

Škare za orezivanje voćaka i vinove loze proizvode se kao velikoserijski ručni alat od ugljičnog ili niskolegiranog alatnog čelika s površinski otvrdnutim oštricama. Trajnost njihove oštrice ovisi o učestalosti primjene, vrsti orezivanja voćaka ili vinove loze te uvjetima skladištenja i odlaganja nakon uporabe. U najvećem broju slučajeva trajnost površinski kaljene oštrice ručnih škara se dodatno smanjuje pojavom elektrokemijske korozije zbog biljnih ostataka tijekom uporabe i izlaganja vlazi u neadekvatnom skladištenju. U radu treba opisati konstrukcijske izvedbe ručnih škara za orezivanje voćaka, svojstva čelika za njihovu izradu te postupke modificiranja površine škara površinskim kaljenjem, nitrokarburiranjem i boriranjem.

U eksperimentalnom dijelu rada treba predložiti parametre postupka i provesti nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER i boriranje u prašku istovrsnih ručnih škara. Nakon ispitivanja površinske tvrdoće oštrice, provesti trošenje indukcijski kaljenih, nitrokarburiranih i boriranih škara rezanjem grana izabrane voćke. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalni postupak za povećanje trajnosti ručnih škara.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

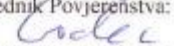
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. Ručne škare za orezivanje voćki.....	2
2.1. Konstrukcija škara.....	2
2.2. Mehanizam škara .....	2
2.3. Sila rezanja .....	3
2.4. Mehanizmi trošenja škara za orezivanje voćaka.....	5
2.4.1. Abrazivno trošenje .....	5
2.4.2. Adhezijsko trošenje.....	5
2.4.3. Umor materijala .....	6
2.4.4. Korozija.....	6
2.4.5. Plastična deformacija .....	6
2.4.6. Trošenje mehanizama za otvaranje i zatvaranje škara .....	6
3. Postupci modificiranja površina .....	7
3.1. Nitriranje i nitrokarburiranje .....	7
3.1.1. Struktura i svojstva nitriranog sloja .....	7
3.1.2. Postupci nitriranja .....	12
3.1.2.1. Nitriranje u solnoj kupki .....	12
3.1.2.2. Nitriranje u plinu.....	14
3.1.2.3. Nitriranje u plazmi .....	15
3.1.3. Primjena nitriranja i nitrokarburiranja .....	18
3.2. Boriranje.....	19
3.2.1. Struktura i svojstva boriranih slojeva.....	19
3.2.2. Dubina i brzina rasta boridnog sloja .....	21
3.2.3. Postupci boriranja .....	24
3.2.3.1. Boriranje u plinovitom sredstvu.....	26
3.2.3.2. Boriranje u kapljevitom sredstvu .....	26
3.2.3.3. Boriranje u prašku.....	26
3.2.4. Svojstva i primjena boriranih dijelova .....	28
4. Metode za ispitivanje tvrdoće i izgleda reznih oštrica.....	31
4.1. Ispitivanje tvrdoće ultrazvučnom sondom NOVOTEST UCI U1 .....	31
4.2. Ispitivanje tvrdoće metodom VICKERS HV1 .....	32
4.2. Svjetlosna mikroskopija .....	33
5. Priprema uzoraka i ispitivanja .....	36
5.1. Plan pokusa .....	36

---

5.1.1. Nitrokarburiranje.....	36
5.1.2. Boriranje .....	37
6. Rezultati mjerenja tvrdoće oštrice .....	38
6.1. Rezultati mjerenja tvrdoće HV1 metodom .....	38
6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće NOVOTEST UCI U1 metodom .....	39
6.3. Rezultati trošenja u terenskom ispitivanju .....	40
6.4. Analiza trošene površine .....	44
7. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Škare za orezivanje vočki .....	2
Slika 2. Mehanizam škara .....	3
Slika 3. Opis principa poluge na škarama za orezivanje vočki .....	4
Slika 4. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina .....	7
Slika 5. Dijagram stanja Fe-N .....	8
Slika 6. Utjecaj temperature na svojstva nitriranog sloja .....	9
Slika 7. Utjecaj vremena na svojstva nitriranog sloja .....	9
Slika 8. Debljina nitriranog sloja .....	10
Slika 9. Mikrostruktura površinskog sloja nitriranog čelika .....	11
Slika 10. Postupci nitriranja i nitrokarburiranja .....	12
Slika 11. Dijagram postupka TENIFER i TENIFER QPQ .....	13
Slika 12. Spremnik za nitrokarburiranje u kupki TENIFER .....	14
Slika 13. Spremnik za nitriranje u plinu .....	15
Slika 14. Shematski prikaz uređaja za ionsko nitriranje .....	16
Slika 15. Dijagram struje i napona prilikom nitriranja u plazmi .....	17
Slika 16. Vakuumska peć za nitriranje u plazmi .....	18
Slika 17. Primjer nitriranih i nitrokarburiranih dijelova .....	19
Slika 18. Slojevi nastali prilikom boriranja .....	20
Slika 19. Raspored tvrdoće na boriranom uzorku .....	21
Slika 20. Shematski prikaz određivanja dubine boridnog sloja .....	22
Slika 21. Dijagram ovisnosti debljine bora i vremena prilikom boriranja .....	23
Slika 22. Mikrostruktura boriranog sloja na C15 čeliku koji se sastoji od <i>Fe B</i> (tamne) i <i>Fe<sub>2</sub> B</i> (svijetle) faze. ....	24
Slika 23. Priprema obratka za boriranje u prašku .....	27
Slika 24. Korozivni učinak mineralnih kiselina na borizirani i neborizirani čelik C45 .....	29
Slika 25. Borirani zupčanici .....	29
Slika 26. Borirani alati za ekstrudiranje .....	30
Slika 27. NOVOTEST uređaj i aplikacija na mobitelu .....	31
Slika 28. Shematski prikaz Vickers indentora i otiska .....	32
Slika 29. Unutrašnjost solne kupke Tenifer .....	36
Slika 30. Komorna elektrootporna peć „Pika“ .....	37
Slika 31. Tvrdomjer Wilson-Wolpert Tukon 2100B .....	38
Slika 32. Drvo jabuke .....	40
Slika 33. Uvećana površina oštrice škara A .....	44
Slika 34. Veća oštećenja oštrice na škarama A .....	45
Slika 35. Uvećana površina oštrice škara B .....	45
Slika 36. Uvećana površina oštrice škara C .....	46



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Opis zona spojeva nitriranog čelika .....	11
Tablica 2. Vrste sredstava za boriranje .....	25
Tablica 3. Tvrdća oštrice indukcijski kaljenih škara .....	38
Tablica 4. Tvrdća oštrice indukcijski kaljenih, nitrokarburiranih i boriranih škara.....	39
Tablica 5. Debljina izdanaka .....	41
Tablica 6. Stanje oštrica škara u terenskom ispitivanju .....	42

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
A	$mm^2$	Poprečni presjek
D	$m^2/s$	Difuzijski koeficijent
d	m	Aritmetička sredina izmjerenih dijagonala otiska indentora
$\frac{dc}{dx}$	$mol/m^4$	Gradijent koncentracije
F	N	Sila
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
HRC	-	Tvrdoća po Rockwellu
J	$mol/(m^2s)$	Brzina difuzije
k	$m \cdot s^{-\frac{1}{2}}$	Parabolički koeficijent
t	s	Vrijeme boriranja
$\tau$	$N/mm^2$	Smično naprezanje
u	m	Debljina boridnog sloja

**SAŽETAK**

U radu se opisuje trošenje škara za orezivanje voćaka i vinove loze i mogućnosti povećanja otpornosti na trošenje postupcima nitrokarburiranja i boriranja. U teorijskom dijelu rada objašnjene su konstrukcijske izvedbe ručnih škara za orezivanje voćaka, svojstva čelika za njihovu izradu te postupci modificiranja površine škara površinskim kaljenjem, nitrokarburiranjem i boriranjem. U eksperimentalnom dijelu rada provedeni su postupci nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER i boriranje u prašku istovrsnih ručnih škara za orezivanje voćaka. Nakon ispitivanja površinske tvrdoće, provedeno je ispitivanje trošenja na istim škarama i ocjena istih. Najmanje trošenje postignuto je kod boriranih škara.

Ključne riječi: škare za orezivanje voćaka, nitrokarburiranje, boriranje, trošenje

---

**SUMMARY**

The work describes the wear of scissors for pruning fruit trees and vines and the possibility of increasing wear resistance by nitrocarburizing and boronizing procedures. In the theoretical part of the paper, the construction performance of hand shears for pruning fruit trees, the properties of the steel for their manufacture, and the procedures for modifying the surface of the shears by surface hardening, nitrocarburizing, and boronizing are explained. In the experimental part of the work, nitrocarburizing procedures were carried out in the salt shop TENIFER and powder boring of similar hand shears for pruning fruit trees. After testing the surface hardness, wear analysis was performed using light microscopy. The least wear was achieved with boron shears.

Key words: scissors for pruning fruit trees, nitrocarburizing, boring, wear

# TEORIJSKI DIO

## **1. UVOD**

Škare za orezivanje voćki, ključan alat u voćarstvu, izložene su intenzivnom trošenju koje može značajno utjecati na njihovu dugovječnost i funkcionalnost. U radu se istražuju postupci modificiranja površina kao inovativan pristup za povećanje otpornosti na trošenje voćarskih škara, te produljivanje njihovog radnog vijeka.

Postupci modificiranja površina pružaju različite metode za poboljšanje svojstava materijala, a među njima se ističu nitrokarburiranje i boriranje. Nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER i boriranje u prašku predstavljaju postupke toplinske obrade koje omogućuju stvaranje površinskih slojeva s poboljšanim mehaničkim svojstvima. Ovi postupci ne samo da povećavaju tvrdoću materijala, već i pridonose otpornosti na habanje, ključnom faktoru u kontekstu za trajnost oštrica ručnih voćarskih škara.

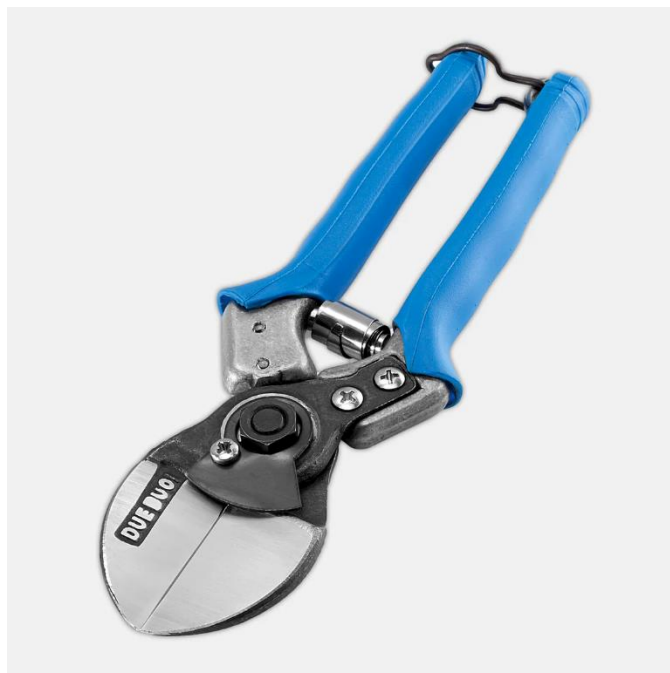
U teorijskom dijelu rada detaljno će se analizirati konstrukcija voćarskih škara, mehanizmi trošenja i ključni dijelovi škara su izloženi ovom procesu.

Eksperimentalnom dijelu ispitati će se primjena nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER i boriranja u prašku na komercijalno nabavljenim indukcijски kaljenim škarama u eksploatacijskom ispitivanju.

## 2. Ručne škare za orezivanje vočki

### 2.1. Konstrukcija škara

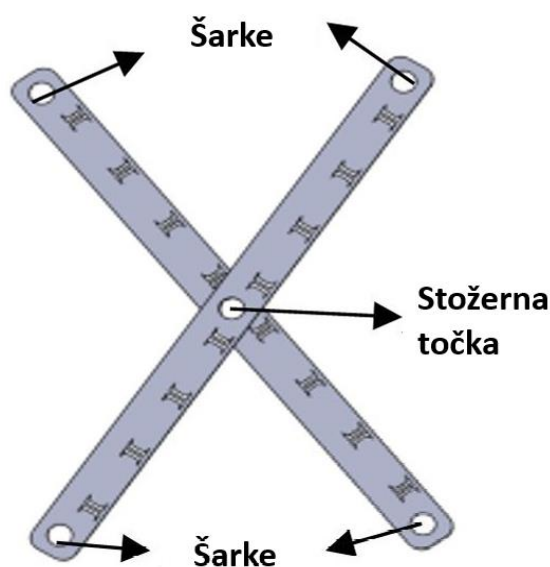
Škare za orezivanje vočki s dvostrukom oštricom sastoje se od reznih oštrica, ručki i tlačne opruge. Ručke predstavljaju poluge koje korisnik drži i pritišće kako bi izvršio rez. Oštrice su ključni dio, s obje oštrice koje se kreću prema sredini tijekom rezanja[4]. Primjer škara za orezivanje vočki je prikazan na slici 1.



Slika 1. Škare za orezivanje vočki [1]

### 2.2. Mehanizam škara

Na slici 2, shematski je prikazan mehanizam škara. Središnji zglob je točka oko koje se okreću oštrice prilikom otvaranja i zatvaranja škara. Vijci i osovina povezuju dijelove škara, omogućujući pravilan rad mehanizma. Prirubnice čvrsto drže obje oštrice zajedno tijekom rezanja, dok opruga pruža otpor i vraća oštrice u otvoreni položaj nakon svakog reza.



Slika 2. Mehanizam škara [2]

### 2.3. Sila rezanja

U interakciji između škara i objekta obrade, ključne su pojave lokalne deformacije obratka i njegov lom, odnosno odrez. U trenutku kada oštrice škara dođu u kontakt s objektom, dolazi do značajne lokalne deformacije obratka i vrlo male deformacije materijala rezne oštrice. Kada ta deformacija dosegne određenu razinu, nastupa prijelom materijala, rezultirajući odvajanjem objekta.

Općenito je teško izravno izračunati sile lokalne deformacije objekta u stvarnom vremenu, s obzirom na složenost materijala i konstitutivnih svojstava. Međutim, analitičkim pristupom moguće je procijeniti sile lokalne deformacije pomoću mjerenja reakcija sila.

Mehanika loma pruža energetski pristup mjerenju čvrstoće objekta, uzimajući u obzir rast pukotina. Razvoj pukotine unutar materijala zahtijeva određenu količinu energije, ovisnu o području pukotine i otpornosti materijala na lom. Čvrstoća loma interpretira se kao materijalna svojstva koja definiraju energiju potrebnu za odvajanje jedinične površine materijala, predstavljajući otpor reznom alatu. Prilikom rezanja škarama, sila koja se osjeća između prstiju rezultat je dviju glavnih komponentata - sile trenja između oštrica i sile rezanja objekta.

Sila koja je potrebna za rezanje, određuje se prema formuli za smično naprezanje.

$$\tau = \frac{F_{rez}}{A} \geq \tau_{dop} \quad (1)$$

Gdje je  $F_{rez}$  sila rezanja, a  $A$  je poprečni presjek grane koje se škarama trebaju prerezati.



Sila rezanja jednaka je:

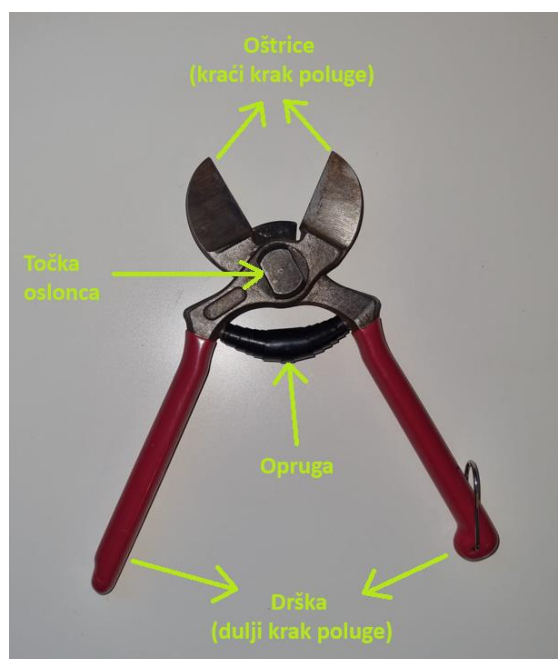
$$F_{rez} \geq \tau_{dop} \cdot A \quad (2)$$

Dok je površina  $A$  jednaka:

$$A = \frac{d^2\pi}{4} \quad (3)$$

U proučavanju sile rezanja škara, primjenjuje se osnovni princip poluge. Poluga, kao jednostavna naprava, predstavlja čvrsto tijelo koje se, pod utjecajem sile, može zakretati oko svoje osi. Iako poluga ne smanjuje apsolutnu količinu rada koji se obavlja, olakšava se samo izvođenje tog rada. Ovaj princip posebno dolazi do izražaja kod škara za orezivanje voćki.

U konkretnom slučaju poluge prvog reda na škarama, točka oslonca, odnosno zglob, smještena je u sredini između opterećenja (ploda ili grane koju režemo) i napora (sile koju korisnik primjenjuje) kao što je prikazano na slici 3. Ključno je odrediti optimalno mjesto točke oslonca kako bi se postigla ravnotežu u sustavu.



**Slika 3. Opis principa poluge na škarama za orezivanje voćki**

Kada su krak opterećenja i krak napora jednaki, što znači da je točka oslonca idealno postavljena, mehanička korist sustava je jednaka jedan, a sustav je u ravnoteži. Ovo znači da napor koji korisnik ulaže u škare približno odgovara sili potrebnoj za rezanje.

S povećanjem udaljenosti točke oslonca prema opterećenju (produženjem kraka napora), potrebna sila za savladavanje opterećenja smanjuje se, čime se postiže mehanička prednost dužeg kraka poluge. Suprotno tome, ako je točka oslonca pomaknuta prema mjestu gdje korisnik djeluje (skraćenje kraka napora), povećava se sila potrebna za rezanje, rezultirajući manjim iskorištenjem mehaničke sile pritiska na ručke škara. Primjena opisanog zakona poluge u konstrukciji škara za orezivanje voćki ključna je za stvaranje učinkovitog i korisnički prihvatljivog ručnog alata .

## **2.4. Mehanizmi trošenja škara za orezivanja voćaka**

Ručne škare za orezivanje voćaka u radu su izložene kontaktnim naprezanjima i lokalnim plastičnim deformacijama te zajedničkom djelovanju više mehanizama trošenja: abrazijskom, adhezijskom, trošenju umorom površine te atmosferskoj koroziji [4].

### **2.4.1. Abrazivno trošenje**

Abrazivno trošenje jedan je od najčešćih oblika trošenja kod škara za obrezivanje voćaka. Ovaj tip trošenja nastaje uslijed trenja između oštrica škara i materijala koji se reže, odnosno grana voćaka u ovom slučaju. Tijekom obrezivanja, oštrice dolaze u kontakt s tvrdom i hrapavom površinom grana, što uzrokuje postepeno skidanje materijala s oštrica. Abrazivno trošenje ovisi o tvrdoći materijala oštrica i grana, kao i o uvjetima korištenja škara. S vremenom, ovo trošenje rezultira smanjenjem oštine alata, što zahtijeva redovito oštrenje kako bi se održala njihova funkcionalnost.

### **2.4.2. Adhezijsko trošenje**

Adhezijsko trošenje javlja se kada dolazi do prijanjanja (adhezije) materijala s grana na površinu oštrica škara, a potom do odvajanja tog materijala zajedno s dijelom oštrice. Ovaj oblik trošenja manje je izražen, ali može biti značajan kod obrezivanja sočnih grana koje sadrže velike količine sokova. Sokovi iz biljaka mogu stvoriti tanki film na oštricama, što povećava trenje i potiče lijepljenje materijala. S vremenom, takvo trošenje može rezultirati stvaranjem sitnih udubljenja na oštricama, što dodatno smanjuje njihovu učinkovitost.

### **2.4.3. Umor materijala**

Umor materijala odnosi se na postupno nakupljanje mikro pukotina unutar materijala oštrica, koje nastaju uslijed ponavljajućih opterećenja tijekom dugotrajne upotrebe. Svaki rez predstavlja opterećenje za oštrice, a ponavljajuća opterećenja uzrokuju koncentraciju naprezanja na određenim točkama. Ove napregnute točke s vremenom postaju mjesta inicijacije pukotina. Ako se škare koriste često i pod velikim opterećenjem, pukotine se mogu širiti, što može dovesti do loma oštrica ili drugih dijelova škara.

### **2.4.4. Korozija**

Korozija je proces kemijskog ili elektrokemijskog razgradnje metala uslijed reakcije s okolinom, najčešće s vlagom i kisikom iz zraka. Ukoliko se škare ne održavaju pravilno, odnosno ne čiste i ne suše nakon korištenja, dolazi do stvaranja hrđe na oštricama i drugim metalnim dijelovima. Korozija ne samo da slabi oštrice, nego i povećava trenje, što otežava obrezivanje i skraćuje vijek trajanja škara. Redovito čišćenje, sušenje i podmazivanje škara mogu značajno smanjiti rizik od korozije.

### **2.4.5. Plastična deformacija**

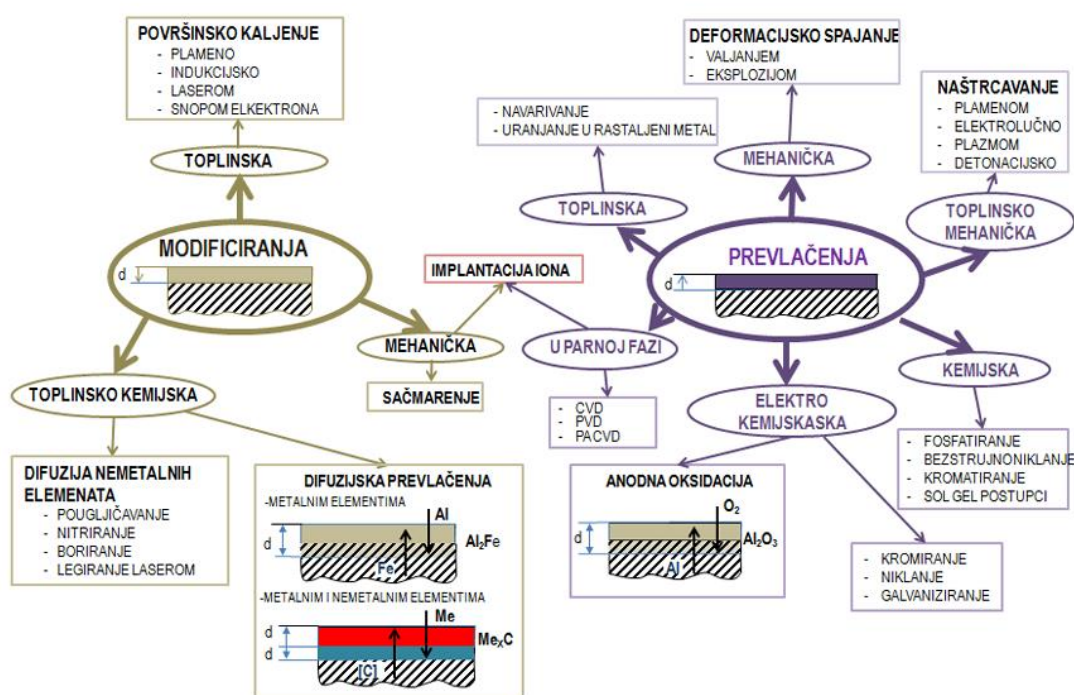
Plastična deformacija nastaje kada su škare izložene prevelikom opterećenju koje premašuje granicu elastičnosti materijala oštrica ili drugih dijelova škara. U takvim slučajevima, materijal se trajno deformira, što može dovesti do gubitka preciznosti i učinkovitosti alata. Primjeri plastične deformacije uključuju savijanje oštrica ili deformaciju ručki škara. Takve deformacije su nepovratne i mogu značiti kraj uporabne vrijednosti alata ako su izražene u značajnoj mjeri.

### **2.4.6. Trošenje mehanizama za otvaranje i zatvaranje škara**

Mehanizmi za otvaranje i zatvaranje škara, uključujući opruge, zglobove i šarke, također su podložni trošenju tijekom vremena. Konstantno opterećenje i naprezanje ovih mehanizama mogu uzrokovati njihovo slabljenje, deformaciju ili lom. Redovito podmazivanje i održavanje ovih dijelova može pomoći u smanjenju trošenja i produljenju njihovog vijeka trajanja

### 3. Postupci modificiranja površina

Inženjerstvo površina predstavlja ključnu disciplinu unutar šireg područja materijala i inženjerstva kao što se može vidjeti na slici 4, čija je svrha unapređivanje svojstava materijala modificiranjem površina [5, 6]. Povijest inženjerstva površina obilježena je kontinuiranim tehnološkim napretkom i rastućom potrebom za razvojem materijala s poboljšanim svojstvima. Modificiranje površina, primijenjeno u raznim industrijama poput automobilske, zrakoplovne, medicinske, energetske, metalurgije, alatnog sektora i elektronike, pridonosi povećanju otpornosti na trošenje, otpornosti na koroziju, smanjenju trenja te poboljšava trajnost i svojstva alata i dijelova, posebice u primjeni u poljoprivredi.



Slika 4. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina [5]

#### 3.1. Nitriranje i nitrokarburiranje

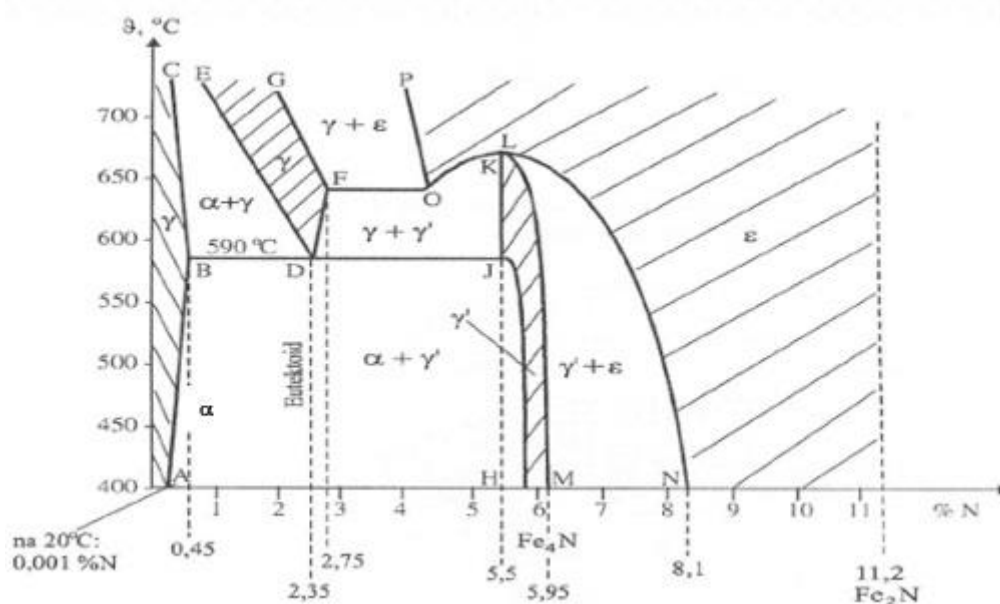
##### 3.1.1. Struktura i svojstva nitriranog sloja

Nitriranje, i nitrokarburiranje, predstavljaju procese obogaćivanja površinskog sloja metalnih materijala dušikom ili dušikom i ugljikom djelovanjem topline i difuzijskih procesa.

Ovi postupci provode se izlaganjem željeznih materijala, poput čelika ili željeznog lijeva, aktivnom mediju koji je izvor dušika (i ugljika) na temperaturama između 500°C do 600°C.

Osnovna svrha nitriranja stvaranje zone spojeva difuzijske zone pri nitriranju pri čemu se povećava otpornost na trošenje, dinamička izdržljivosti i postiže se dobra korozivna postojanost. Povećanje dubine nitriranog sloja ostvaruje se produljenjem vremena nitriranja, što rezultira debljom zonom spoja. Dubine prodiranja dušika mogu doseći oko 0,8 mm. Značajna karakteristika nitriranja je stvaranje zaostalih tlačnih naprezanja, koja se smatraju poželjnima zbog poboljšanja materijalne otpornosti na umor [7].

Na slici 5. prikazan je dijagram stanja Fe-N iz kojeg se uočava da se u postupku nitriranja, ovisno o koncentraciji dušika, mogu formirati različite vrste nitrida. Da bi se izbjegla pojava izlučivanja krhkih nitrida u difuzijskoj zoni iznad 590 °C, nitriranje se provodi na temperaturama ispod te vrijednosti. Zbog izbjegavanja austenitne transformacije pri navedenim temperaturama, nema prekrystalizacije, što omogućuje toplinsku obradu bez deformacija volumena.



Slika 5. Dijagram stanja Fe-N [8]

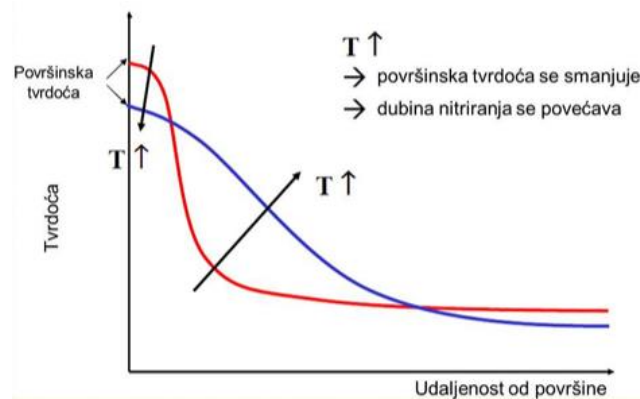
$\alpha$  – faza = BCC kristal mješanac Fe-N, na 590°C otapa 0,45% N, na 20°C otapa 0,001% N

$\gamma$  – faza = FCC kristal mješanac Fe-N, postojan na temperaturi > 590°C, otapa maksimalno 2,75% N ; hlađenjem ispod 590°C stvara eutektoid  $\alpha + \gamma'$

$\gamma'$  – faza = kubično plošna centrirana rešetka, promjenljiva je sastava 5,50... 5,95% N, odgovara kemijskom sloju  $Fe_4N$ , iznad  $650^{\circ}C$  disocira

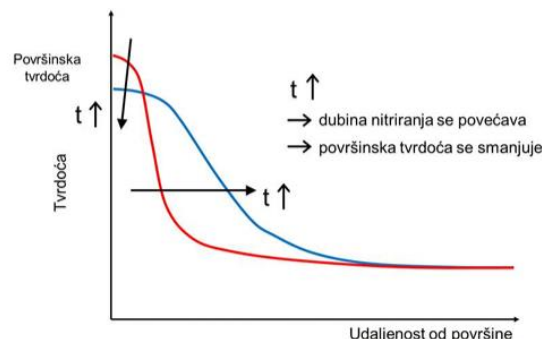
$\epsilon$  – faza = heksagonska (HCP) rešetka, promjenljiva je kemijskog sastava 8,10... 11,20% N, odgovara kemijskom spoju  $Fe_{2,3}N$ , disocira iznad  $500^{\circ}C$

Dodavanje legirajućih elemenata poput kroma, vanadija, molibdena i aluminijskih željeznim materijalima rezultira formiranjem specifičnih nitrida koji značajno utječu na tvrdoću površine i prodiranje difuzijske zone. Na slici 6 možemo vidjeti kako promjena temperature u postupku nitriranja utječe na sama svojstva nitriranog sloja.



Slika 6. Utjecaj temperature na svojstva nitriranog sloja [9]

Na slici 7 prikazano je kako produljenje vremena nitriranja utječe na raspored tvrdoće nitriranog sloja.



Slika 7. Utjecaj vremena na svojstva nitriranog sloja [9]

Nakon postupka nitiranja, na površini materijala uobičajeno nastaje zona spojeva i difuzijska zona. Zona spojeva je debljine od 2 do 20  $\mu\text{m}$ , a svojstvena joj je visoka tvrdoća i korozijska otpornost. Ispod zone spojeva se nalazi difuzijski sloj, čija debljina varira između 0,1 do 0,8 mm (slika 8).



Slika 8. Debljina nitiranog sloja [10]

Zona spojeva obuhvaća željezne nitride i/ili karbonitride, čime stvara keramički karakter površine. U zoni spojeva prisutne su i pore, čija količina i raspored ovise o materijalu i vrsti postupka. Ovisno o koncentracijskoj raspodjeli dušika i ugljika, zona spojeva može zauzimati jedan od tri oblika prema dubini [5, 9, 10]:

- $\gamma'$  sloj spoja sadrži  $\gamma'$ -nitrid  $Fe_4N$
- $\epsilon$  sloj spoja sadrži više dušika i  $Fe_{2-3}N$
- zadnji sloj spoja sadrži miješane faze spoja  $\gamma'$  i  $\epsilon$

Difuzijska zona sadrži precipitate nitrída, specijalne nitride, karbide i otopljeni dušik. Karakterizira ju povećana tvrdoća u odnosu na poboljšani osnovni materijal. Slika 9. prikazuje mikrostrukturu površinskog sloja nitiranog čelika.



Slika 9. Mikrostruktura površinskog sloja nitriranog čelika [10]

Tablica 1 pokazuje različite temperature pri kojima se izvodi proces nitriranja za pojedine zone, također nam govori koliko je vremena potrebno za određenu zonu i svojstva svake zone.

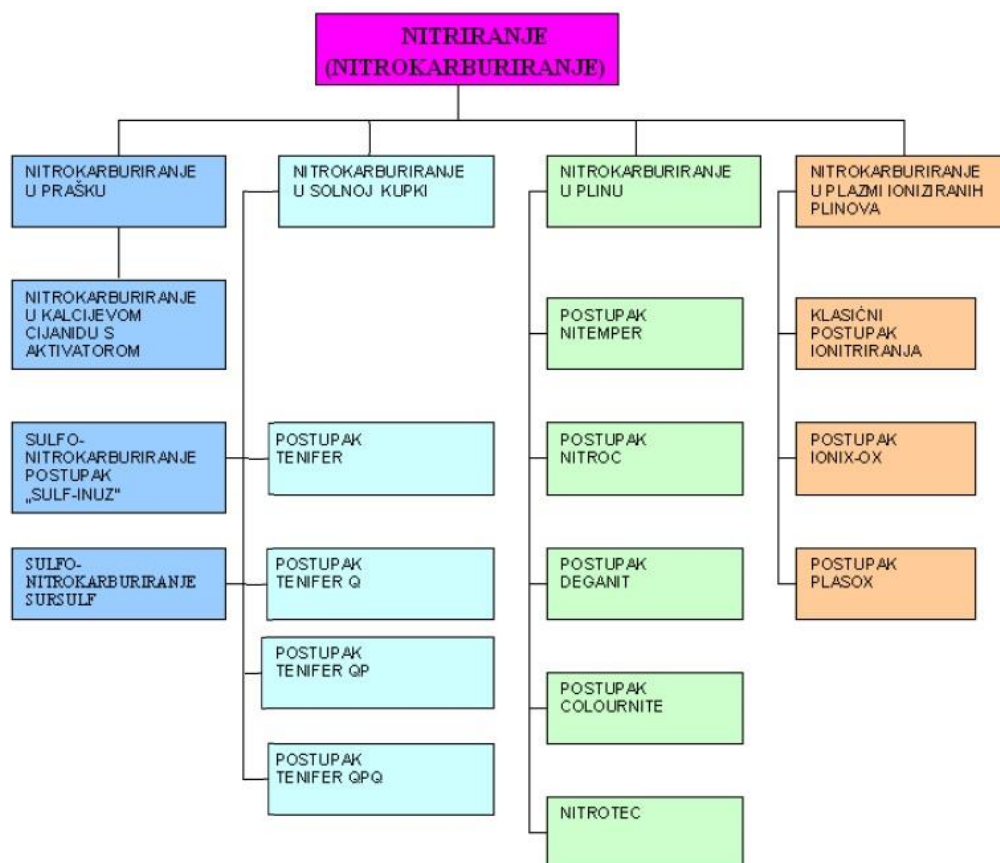
Tablica 1. Opis zona spojeva nitriranog čelika

Zona spoja	$\epsilon$ zona spojeva	$\gamma'$ zona spojeva	Difuzijska zona
Temperatura	$\approx 570^\circ\text{C}$	$500-570^\circ\text{C}$	$530-550^\circ\text{C}$
Vrijeme nitriranja	1 ... 6 h	> 1 h	< 6 h
Svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• visoka hrapavost</li> <li>• krhkost</li> <li>• vrlo nizak faktor trenja</li> <li>• vrlo dobra otpornost na trošenje zbog velike debljine i visoke tvrdoće</li> <li>• viša otpornost na koroziju</li> <li>• podmazivanje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• niža tvrdoća</li> <li>• nizak faktor trenja</li> <li>• manja debljina</li> <li>• viša žilavost, ali niža otpornost na trošenje</li> <li>• otpornost na pritiske i udarna opterećenja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dinamička izdržljivost</li> </ul>



### 3.1.2. Postupci nitriranja

Različiti postupci nitriranja (nitrokarburiranja) obuhvaćaju primjenu plinova, solnih kupki i ioniziranih plinova, kako prikazuje slika 10. Svaki od tih postupaka rezultira specifičnim svojstvima i strukturom rubnog sloja. Nitrirani sloj formira se na površini obrađenog materijala, a ističe se po povećanom udjelu dušika. Uobičajeno, osim dušika, u ovaj površinski sloj unose se i drugi nemetali poput ugljika, kisika i sumpora. Kada prateći element uključuje ugljik, postupak često nazivamo nitrokarburiranje.

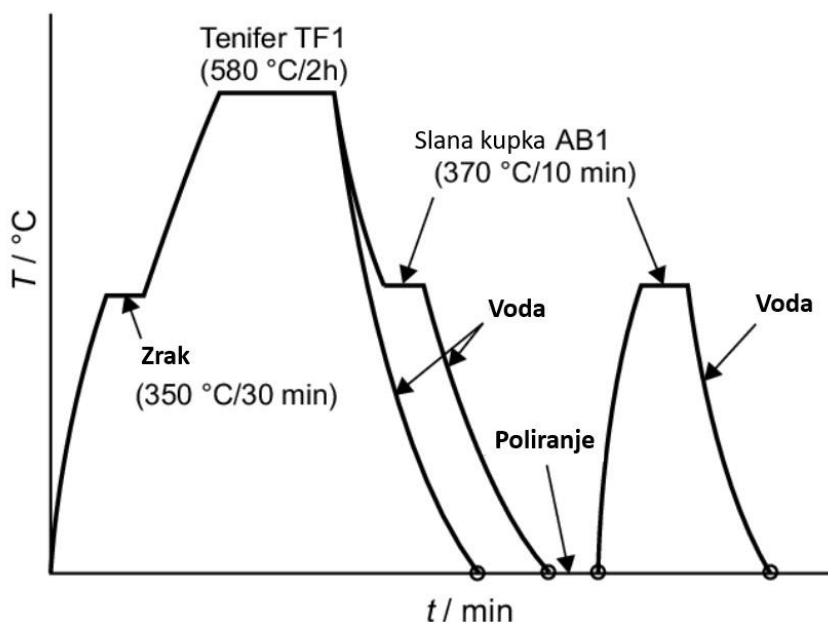


Slika 10. Postupci nitriranja i nitrokarburiranja [5, 10]

#### 3.1.2.1. Nitriranje u solnoj kupki

Solna kupka postala je popularna tehnika nitriranja, zbog svoje jednostavnosti, brzine obrade i nižih kapitalnih ulaganja u odnosu na druge toplinske obrade. Nitriranje u solnoj kupki također je jednostavan za provedbu jer zahtijeva nadzor samo temperature, vrijeme obrade i sastav solne kupke. Proizvodni troškovi su znatno manji u usporedbi s drugim metodama nitriranja čelika, čime je ova metoda postala ekonomski isplativa .

Prednosti upotrebe opreme za nitriranje u solnoj kupki uključuju relativno niske operativne troškove, nisku potrebu za održavanjem, jednostavnost rada, zahtjev za nižim razinama vještine, mogućnost korištenja manjih peći koje zauzimaju manje prostora, jednostavnost pokretanja i isključivanja, te brže difuzijske cikluse. Unatoč navedenim prednostima, tehnologija nitriranja u solnoj kupki suočava se s izazovima zbog toksičnosti. Korištene soli sadrže potencijalno opasne cijanide, što ograničava primjenu ove metode zbog povezanosti s toksičnim svojstvima cijanidno-cijanatnih soli. Bitno je otpadne vode nakon korištenja prikladno odstraniti. Ovaj tip nitriranja koristi soli s visokim udjelom dušika, ali i određenu količinu ugljika. Kada se soli otapaju pod utjecajem topline, oslobađa se dušik koji dalje difundira kroz materijal čelika. Proces difuzije započinje kada se čelik ubaci u peć s otopljenom soli i temperatura raste.



Slika 11. Dijagram postupka TENIFER i TENIFER QPQ [11]

Postupak TENIFER i TENIFER QPQ sastoje se od više faza, kao što možemo vidjeti na slici 11. Prva faza je predgrijavanje na zraku pri  $350^\circ\text{C}$  oko 30 minuta. Zatim slijedi nitriranje u solnoj kupki TF1 2 sata na temperaturi od  $580^\circ\text{C}$ . TENIFER postupak završava hlađenjem u vodi do sobne temperature. Postupak TENIFER QPQ nakon toga slijedi, te ga nastavljamo hlađenjem u slanoj kupki AB1 pri  $370^\circ\text{C}$  10 minuta. Iz slane kupke AB1 nitrirani obradak hladimo u vodi. Postepenim hlađenjem u solnoj kupki i vodi smanjujemo mogućnosti nastanka pukotina na obratku.

Obradak iz kupke izlazi sa stvorenim slojem ( $Fe_3O_4$ ) kojeg je potrebno ispolirati finim brusnim papirom. Poslije poliranja obradak opet stavljamo u slanu kupku zagrijanu na  $370^{\circ}C$  u trajanju od 10 minuta. Zatim opet hladimo obradak u vodi. TENIFER QPQ postupak tada završava. Q potječe od engleske riječi „quenching“, hrvatski gašenje i P koji potječe od engleske riječi „polishing“, hrvatski poliranje. Na slici 12 je spremnik za nitrokarburiranje u kupki TENIFER. [11]



Slika 12. Spremnik za nitrokarburiranje u kupki TENIFER

### 3.1.2.2. Nitriranje u plinu

Toplinsko-kemijski površinski tretmani u plinovitoj fazi, kao što su nitriranje i nitrokarburiranje, ubrajaju se među najsvestranije metode modifikacije površine čelika. Ovi postupci omogućuju poboljšanje otpornosti na umor, trošenje i atmosfersku koroziju čelika. Plinsko nitriranje obavlja se u atmosferi koja sadrži dušik, obično u prisustvu amonijaka, pri temperaturama između  $495$  i  $560^{\circ}C$ . Amonijak ( $NH_3$ ) se razlaže u peći (s čeličnim predmetima kao katalizatorima) prema sljedećoj jednačbi [8]:



Slobodni dušik difundira u površinske slojeve čeličnih predmeta, a u peć je potrebno kontinuirano unositi svježi  $NH_3$  jer neiskorišteni atomi N prelaze u molekularno stanje  $N_2$ . Unos se kontrolira stupnjem disocijacije amonijaka, što izravno utječe na apsorbiranu količinu

dušika i kvalitetu nitriranog sloja. Dugotrajno plinsko nitriranje je prikladno samo za čelike za nitriranje .

Prije procesa nitriranja, preporučuje se kaljenje i visoko temperaturno popuštanje čelika, pri čemu temperatura popuštanja treba biti najmanje  $20^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$  viša od temperature nitriranja kako bi se osigurala stabilnost dimenzija i oblika obratka tijekom nitriranja. Plinsko nitriranje može biti izvedeno kao jednostruki ili dvostruki postupak. U jednostrukom postupku, temperature nitriranja variraju između  $495$  i  $525^{\circ}\text{C}$ , rezultirajući tvrdim, ali krhkim slojem obogaćenim dušikom, poznatim kao bijeli sloj. Dvostruki postupak ima prednost u smanjenju debljine bijelog nitridnog sloja. Prva faza, osim po trajanju, replicira jednostruki postupak, nakon čega slijedi druga faza postupka na temperaturama od  $550$  do  $560^{\circ}\text{C}$ . Više temperature tijekom druge faze osiguravaju smanjenje tvrdoće sloja, ali i postizanje veće dubine. Slika 13 prikazuje spremnik za nitriranje u plinu [8].

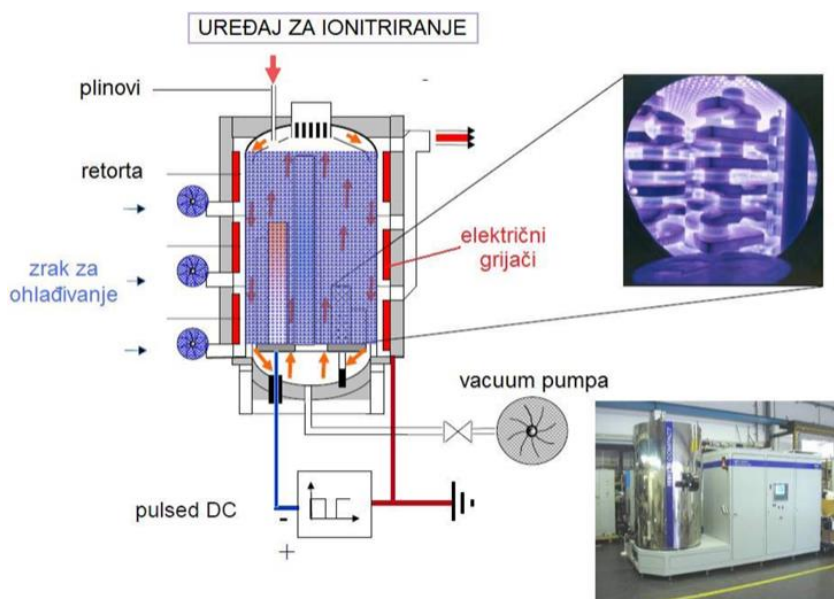


Slika 13. Spremnik za nitriranje u plinu

### 3.1.2.3. Nitriranje u plazmi

Nitriranje ili nitrokarburiranje u plazmi, također poznato kao ionitriranje, predstavlja postupak u kojem se selektivno dodaje dušik, a ponekad i ugljik, u površinu željeznih materijala u vakuumskom okruženju, koristeći niskoenergetsko okruženje plazme. Difuzija dušika i ugljika u ovom slučaju odvija se putem ionizirane smjese plinova koja uključuje dušik, vodik i dodatni

plin koji sadrži ugljik, poput metana ili ugljičnog dioksida. Slika 14 opisuje shematski prikaz uređaja za ionsko nitriranje.



**Slika 14. Shematski prikaz uređaja za ionsko nitriranje [12]**

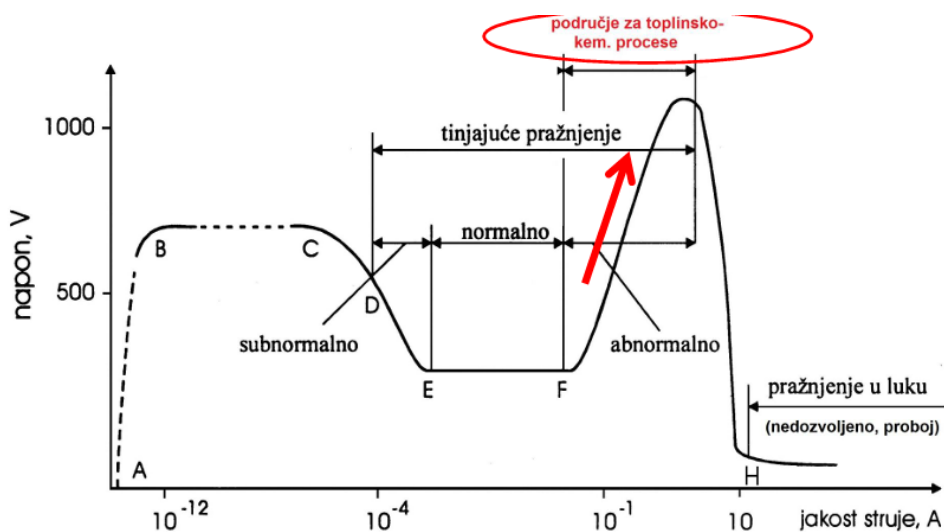
U okviru ioniziranog plina u električnom polju, elektroni ( $e^-$ ) se prenose na anodu, odnosno zid retorte na slici 14. Anioni, ionizirani plin s velikom kinetičkom energijom, bombardiraju površinu šarže (katoda), što rezultira sljedećim učincima [8, 12]:

- a) zagrijavanje površinskog sloja,
- b) izbijanje elektrona, i
- c) izbijanje metalnih elemenata.

Ovi efekti proizlaze iz reakcija metala i plinova, taloženja produkata na površinu dijelova, te adsorpcije, djelomične razgradnje i difuzije.

Izvedba procesa može se odvijati uz hladnu stijenku, gdje se dijelovi griju bombardiranjem ionima pri niskim temperaturama (oko  $500^{\circ}\text{C}$ , primjerice, nitriranje). Alternativno, može se koristiti topla stijenka za dodatno grijanje, posebno pri višim temperaturama (oko  $1000^{\circ}\text{C}$ , primjerice, pougljičavanje). Ovaj kompleksni proces obuhvaća interakciju između elektrona, ioniziranog plina i metalnih dijelova, rezultirajući različitim termičkim i kemijskim efektima na površinskom sloju obrađenih materijala.

Na slici 15. vidimo dijagram jakosti struje i napon pri izvođenju procesa nitriranja u plazmi (ionitiranje).



Slika 15. Dijagram struje i napona prilikom nitriranja u plazmi [6, 12]

Ionsko nitriranje eliminira potrebu za uklanjanjem krhkog bijelog sloja, uobičajenog kod klasičnih postupaka nitriranja u plinu. Ovaj postupak omogućuje dobivanje modificiranog sloja s ujednačenim karakteristikama po cijeloj površini obratka, čak i kod kompleksnih oblika. Manje utječe na konačnu hrapavost površine u usporedbi s nitriranjem u solnim kupkama, smanjujući potrebu za dodatnom obradom. Ionskim nitriranjem postižu se veće vrijednosti tvrdoće nitriranog sloja, zadržavajući istovremeno svojstva jezgre obratka. Primjenjivo je na različite čelike, uključujući nehrđajuće čelike i legure titanija, te čelike dobivene metalurgijom praha.

Postupak nitriranja u plazmi ekološki je prihvatljiviji od nitriranja u solnim kupkama jer koristi netoksične plinove, za razliku od plinskog nitriranja gdje se koristi amonijak ili nitriranja u solnim kupkama gdje se koriste soli na bazi cijanida. Ovaj postupak karakterizira i kraće trajanje obrade, veća iskoristivost energije, te mogućnost potpune automatizacije procesa.

Na slici 16. je prikazana vakuumska peć za nitriranje u plazmi instalirana u laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu



Slika 16. Vakuumska peć za nitriranje u plazmi

### 3.1.3. Primjena nitriranja i nitrokarburiranja

Nitrirani dijelovi predstavljaju ključnu komponentu u raznim industrijskim sektorima, pružajući poboljšane mehaničke karakteristike, otpornost na trošenje te produljeni radni vijek. Ova tehnika toplinsko-kemijske obrade često se primjenjuje u različitim sektorima kako bi se postigli visoki standardi izdržljivosti i pouzdanosti.

U automobilskoj industriji, nitrirani dijelovi, poput dijelova motora, prijenosnika i klipova, igraju ključnu ulogu u postizanju iznimne otpornosti na trošenje, čime se produžuje životni vijek vozila. Slično tome, u zrakoplovnom sektoru, komponente poput klipova, ventila i zupčanika podvrgavaju se nitriranju kako bi se osigurala visoka čvrstoća i izdržljivost. Industrija alata također intenzivno koristi nitrirane dijelove, posebno u reznim alatima i kalupima, čime se postiže poboljšana tvrdoća i dugovječnost. U sektorima plastike i medicinske opreme, nitrirani dijelovi poput alata za ubrizgavanje polimera pružaju potrebnu izdržljivost i pouzdanost u zahtjevnim okruženjima. Energetska industrija također profitira od nitriranih dijelova koji se primjenjuju u energetske postrojenjima, poput vratila i zupčanika, pridonoseći povećanoj izdržljivosti i otpornosti materijala. Osim toga, u industriji alatnih strojeva, nitrirani dijelovi igraju ključnu ulogu u poboljšanju radnih svojstava strojeva za obradu metala i alata za rezanje, te alata za prešanje i lijevanje, kao što možemo vidjeti na slici 17.

Značajke nitriranih dijelova proizlaze iz njihove sposobnosti suočavanja s izazovima trošenja, umora i korozije, čime se pridonosi produženju radnog vijeka i povećanju pouzdanosti.



Slika 17. Primjer nitriranih i nitrokarburiranih dijelova

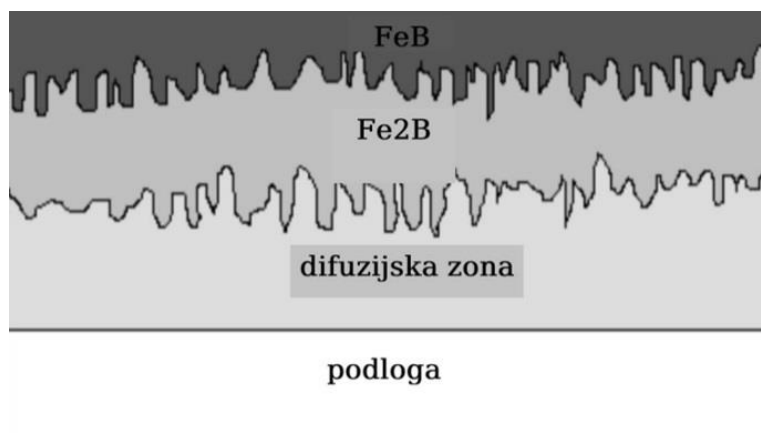
## 3.2. Boriranje

### 3.2.1. Struktura i svojstva boriranih slojeva

Boriranje je proces koji se često primjenjuje u inženjerstvu površina radi poboljšanja mehaničkih svojstava čelika. Ovaj postupak uključuje difuziju atoma bora u površinske slojeve materijala pri visokim temperaturama, stvarajući tvrde slojeve željeznih borida. Ovi slojevi imaju visoku tvrdoću, otpornost na abraziju, adhezivno trošenje te otpornost na koroziju u različitim okruženjima.

Kao i kod drugih difuzijskih procesa, materijal koji se obrađuje mora biti u kontaktu s borom u obliku praha, paste, tekućine ili plina. U kontekstu boriranja ugljičnih čelika, postupak se obično provodi na temperaturama između 800 i 1050°C tijekom 1 do 12 sati. Rezultirajući sloj na slici 18 može se sastojati od jednofaznog borida ( $Fe_2B$ ) ili dvofaznog borida ( $FeB + Fe_2B$ ). Važno je napomenuti da iako je  $FeB$  sloj tvrdi (1800 – 2100 HV) u usporedbi s  $Fe_2B$  slojem (1400 – 1600 HV),  $FeB$  sloj nije uvijek poželjan zbog svoje krhkosti i loše kompatibilnosti s  $Fe_2B$  slojem. Mogu se postići dubine slojeva od nekoliko  $\mu m$  pa sve do 0,3 mm [7, 8].





**Slika 18. Slojevi nastali prilikom boriranja [13]**

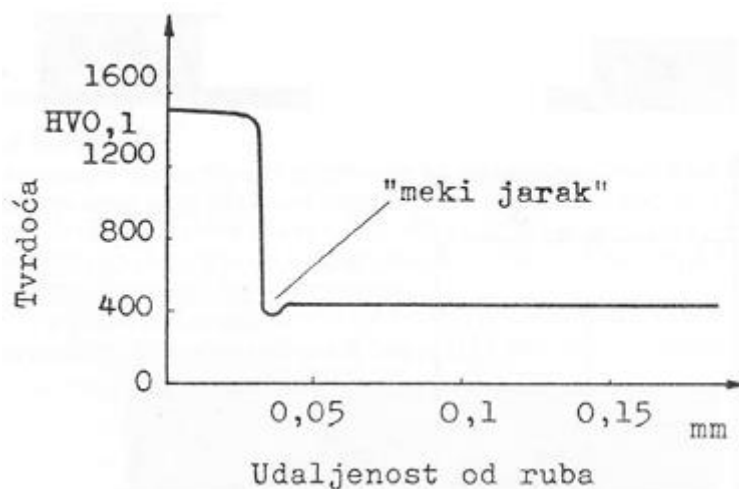
Ovaj postupak boriranja pruža poboljšanja u mehaničkim svojstvima materijala, čineći ga izuzetno otpornim na trošenje i koroziju u zahtjevnim uvjetima. Važno je pažljivo kontrolirati uvjete boriranja kako bi se postigle željene karakteristike površinskog sloja. U slučaju boriranja ugljičnih čelika, optimalni rezultati često proizlaze iz pažljivog balansiranja tvrdoće i mehaničke čvrstoće sloja.

Kod procesa boriranja treba obratiti pažnju na nekoliko važnih aspekata, uključujući pojam "ugljkovog bedema" i utjecaj elemenata poput C (ugljika), Si (silicija) i Al (aluminija) na rezultate boriranja.

U kontekstu "ugljkovog bedema", tijekom difuzije bora u materijalu, dolazi do potiskivanja ugljika (C), što rezultira povećanom koncentracijom ugljika ispod zubi boridnog sloja. Ovaj fenomen važan je za razumijevanje procesa i utječe na mikrostrukturne karakteristike materijala nakon boriranja.

Također, treba uzeti u obzir nepovoljan utjecaj silicija (Si) i aluminija (Al) na rezultate boriranja. Čelik s visokim sadržajem Si ili Al može dovesti do stvaranja "mekog jarka" ispod boridnog sloja. Ovaj "meki jarak" može negativno utjecati na svojstva predmeta u eksploataciji, jer se stvara kontrast između tvrdog ruba i mekše podloge, što može dovesti do smanjenja ukupne izdržljivosti materijala. Slika 19 prikazuje dijagram rasporeda tvrdoće boridnog sloja

na čeliku X38CrMoV5. Važno je pravilno upravljati sastavom materijala i uvjetima boriranja kako bi se izbjegli nepoželjni učinci i postigli optimalne karakteristike površinskog sloja.



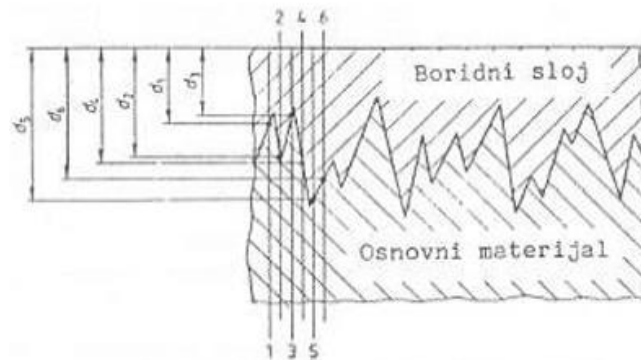
Slika 19. Raspored tvrdoće na boriranom uzorku [5, 8]

### 3.2.2. Dubina i brzina rasta boridnog sloja

Mjerenje dubine boridnog sloja predstavlja izazov, posebice kod niskougličnih čelika, zbog varijacija u dubini zuba boridnog sloja. Da bi se dobila precizna mjera, koriste se različite metode, a rezultati se mogu dobiti na poprečnom presjeku metalografski pripremljenog uzorka.

Jedan pristup mjerenju dubine boridnog sloja uključuje pronalaženje najveće dubine sloja, srednje vrijednosti najduljih zuba i najmanjeg razmaka neborirane jezgre od površine. Ovaj pristup omogućuje identifikaciju ključnih karakteristika sloja.

Drugi pristup uključuje korištenje rastera s prikladnim razmacima između oznaka na poprečnom presjeku uzorka. Na primjer, može se koristiti raster sa svakih 2 mm pri povećanju od 200:1 kao što možemo vidjeti na slici 20. Mjere se razmaci između ruba i granične linije na određenoj dužini (npr. 1000 mm), a dubina sloja određuje se kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti.



**Slika 20. Shematski prikaz određivanja dubine boridnog sloja**

Fickov zakon difuzije i termodinamička jednakost često se koriste u matematičkim modelima koji opisuju rast boridnog sloja tijekom procesa boriranja. Ovi modeli temelje se na pretpostavkama o difuziji atoma bora u čelik tijekom procesa.

Fickov zakon difuzije može se opisati matematički kao [8]:

$$J = -D \times \frac{dc}{dx} \quad (5)$$

gdje:

- $J$  predstavlja brzinu difuzije,
- $D$  je difuzijski koeficijent,
- $\frac{dc}{dx}$  je gradijent koncentracije.

Ako se pretpostavi da se proces ustalio u stacionarnom stanju uz termodinamičku ravnotežu na mjestu dodira boridnog sloja i površine, može se postaviti matematički model za predviđanje rasta boridnog sloja. U ovom modelu povećanje debljine boridnog sloja ovisno je o kvadratnom korijenu vremena boriranja:

$$u = k \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

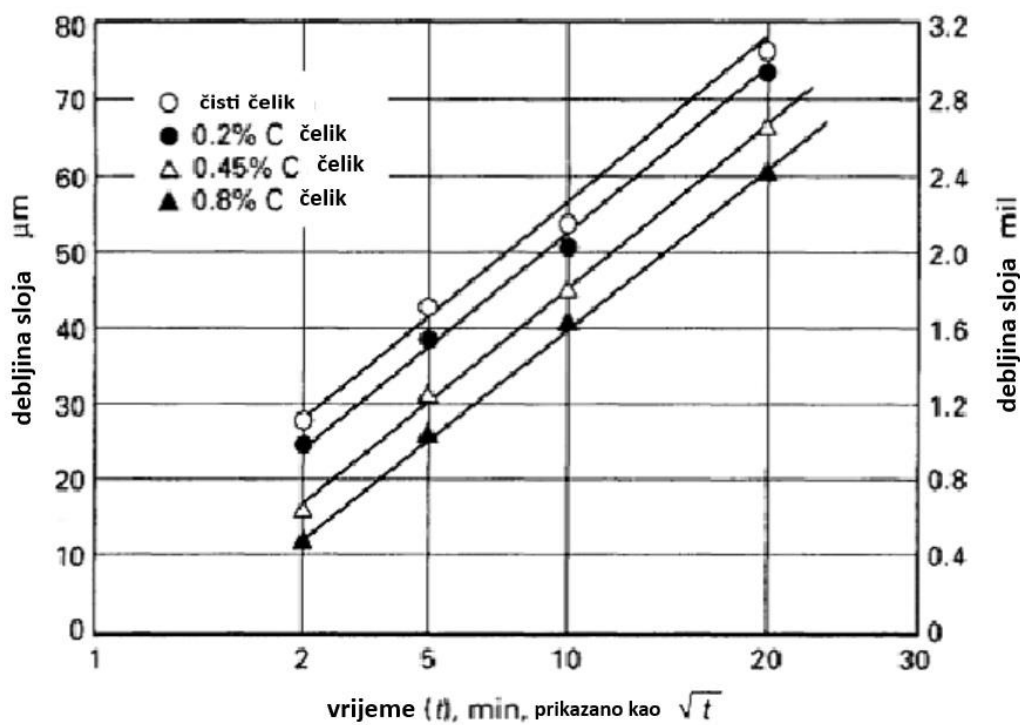
gdje:

$u$  – je debljina boridnog sloja,

$k$  – je parabolički koeficijent,

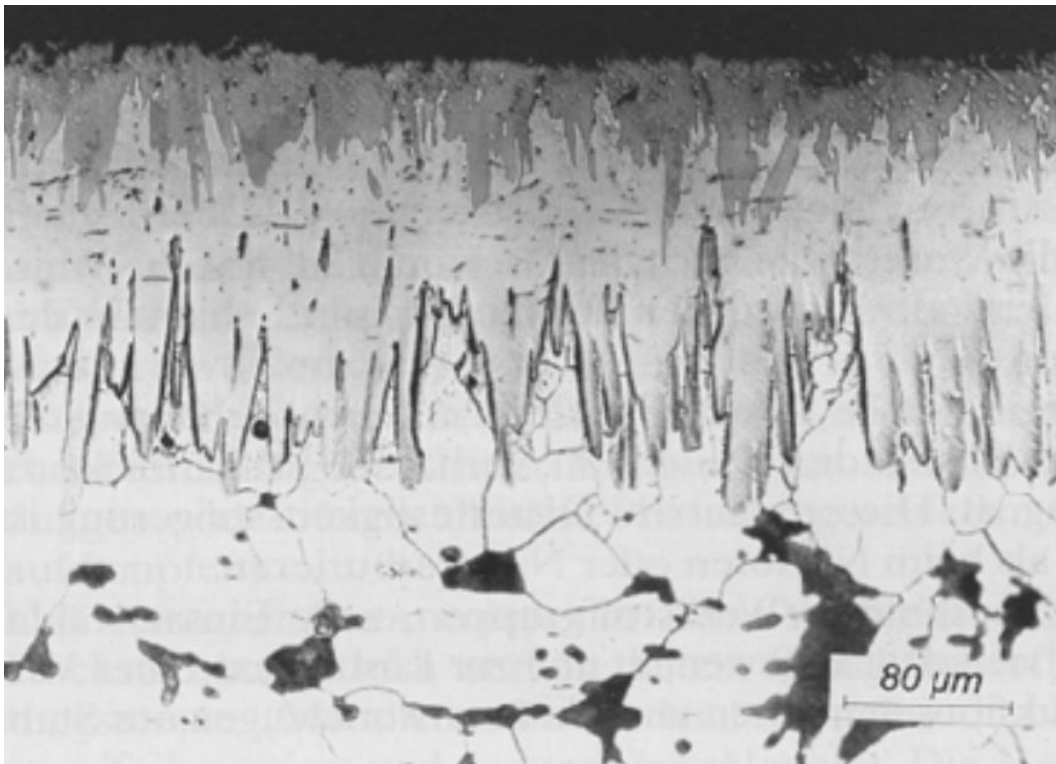
$t$  – je vrijeme boriranja.

Ovaj model sugerira da debljina boridnog sloja raste kvadratno s vremenom boriranja. Važno je napomenuti da vrijednost paraboličkog koeficijenta  $k$  ovisi o specifičnim uvjetima procesa boriranja i materijalu. Na slici 21 vidimo dijagram različitih čelika i ovisnosti vremena boriranja za dobivenu debljinu boridnog sloja.



Slika 21. Dijagram ovisnosti debljine sloja i vremena boriranja [13]

Slika 22 prikazuje nagli prijelaz između boridnog sloja i jezgre, te samu nazubljenost boridnog sloja.



Slika 22. Mikrostruktura boriranog sloja na C15 čeliku koji se sastoji od  $FeB$  (tamne) i  $Fe_2B$  (svijetle) faze.

### 3.2.3. Postupci boriranja

Boriranje se može provoditi na različite načine, uključujući primjenu praška (granulata), pasta, tekućih sredstava i plinova. Svaka metoda ima svoje prednosti i specifičnosti primjene, ovisno o zahtjevima procesa, vrsti materijala koji se obrađuje, i željenim svojstvima površinskog sloja.

U tablici 2 su navedene vrste boriranja, sastav medija za boriranje i postupci boriranja za svaku specifičnu vrstu.

Tablica 2. Vrste sredstava za boriranje

Vrste boriranja	Sastav medija za boriranje	Postupak boriranja
Boriranje u tekućem sredstvu	$Na_2B_4O_7(+NaCl/B_2O_3)$  $HBO_2 + NaF$  Bor ili čvrsti borovi spojevi u fluoridnim taljevinama  $B_4C(+NaCl/ B_2O_3)$  $HBO_2 + NaF$	Elektroliza – predmet je katoda, grafit ili platina su anoda.  Elektroliza – predmet je katoda, a sredstvo za boriranje anoda. Kupka je fluoridna.  Uronjava se u rastaljenu sol, bez elektrolize.  Indukcijsko ugrijavanje u vodenoj otopini.
Boriranje u krutom sredstvu (prašak ili pasta)	$B_4C + Na_3AlF_6$ + etilsilikat  Ferobor + $Na_3AlF_6$ + vodeno staklo  Amorfni bor (+aktivator)  Ferobor(+aktivator)  $B_4C$ (+aktivator)	Indukcijsko ugrijavanje nakon nanošenja paste.  Ugrijavanje u komornoj peći. Pakiranje u prašak ili (parcijalno) premazivanje pastom.
Boriranje u plinovitom sredstvu	$BF_3, BCl_3, BBr_3$ čisti ili vodik  $B_2H_6$ +vodik  $(CH_3)_3B/(C_2H_5)B$	Boriranje plinovitim sredstvom provodi se izložbom predmeta visokim temperaturama putem indukcijskog grijanja ili u cijevnoj peći.

### 3.2.3.1. Boriranje u plinovitom sredstvu

Plinovito boriranje na temperaturi obrade obuhvaća strujanje plinova preko predmeta koji je prethodno zagrijan indukcijski ili u cijevnoj peći. Kao plinovi koji sadrže bor, koriste se borovi halogenidi, diboran ili organski spojevi bora poput borovog trimetila i borovog trietila. Ovaj postupak nudi prednosti, uključujući mogućnost preciznog podešavanja temperature, ravnomjernu distribuciju bora putem cirkulacije plina te eliminaciju potrebe za naknadnom obradom zbog uklanjanja nepoželjnih produkata s površine. Unatoč tim prednostima, boriranje u plinovitom mediju rijetko se primjenjuje u praksi zbog visokih troškova tih sredstava, njihove lakoće zapaljivosti, sklonoći eksplozijama te toksičnosti [8].

### 3.2.3.2. Boriranje u kapljevitom sredstvu

U postupku boriranja u kapljevitom sredstvu, dijelovi koji se obrađuju uranjaju se u vruće kupke rastaljenih, borom bogatih tekućina, obično sastavljenih od boraksa i drugih soli, poput barijevih ili natrijevih soli. Ovaj postupak provodi se na temperaturama višim od 850°C, a koriste se tri glavna načina: -boriranje u solnim kupkama s elektrolizom, bez elektrolize i boriranje u vodenim otopinama s indukcijskim grijanjem [5, 8].

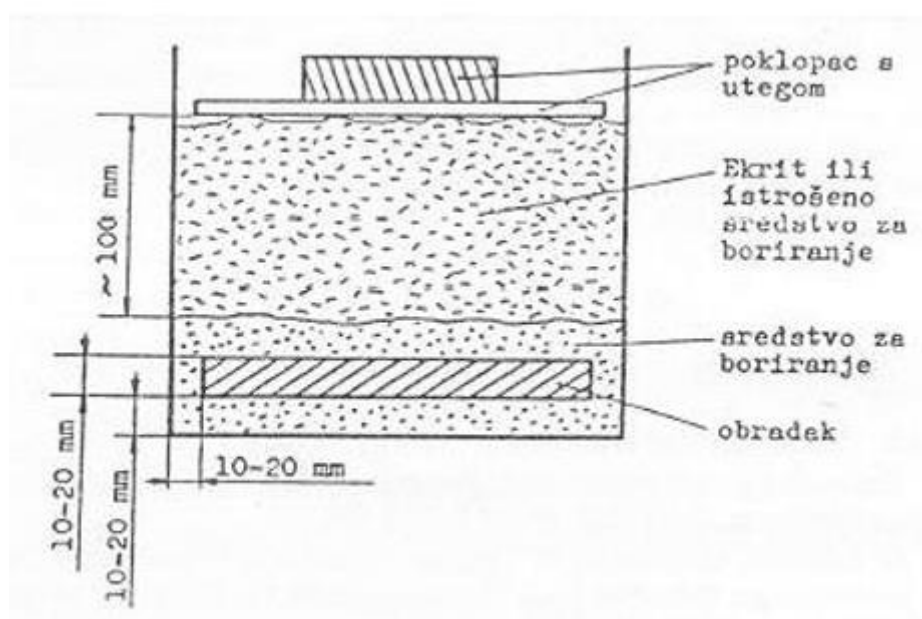
Prednost ovog postupka je omogućavanje cirkulacije rastaljenog sredstva, što osigurava ravnomjernu distribuciju bora na svim površinama. Međutim, postoje i određeni nedostaci, uključujući visoku viskoznost boraksovih taljevina, što otežava postupak, te koroziju aparature zbog djelovanja rastaljenog boraksa. Dodatno, visoke temperature potrebne za održavanje niske viskoznosti mogu rezultirati češćim stvaranjem dvofaznog  $FeB/Fe_2B$  sloja nego kod jednofaznog  $Fe_2B$  sloja. Visoka potrošnja energije također utječe na ukupne troškove postupka.

### 3.2.3.3. Boriranje u prašku

Boriranje u prašku je jedan od najčešće primijenjenih postupaka zbog svoje jednostavne provedbe. Početno su korišteni amorfn bor i drugi aktivatori, ali rezultirali su tankim i poroznim slojevima. Moderni granulat sadrži borkarbid ( $B_4C$ ) i boraks, dok Kaliumflouoroborat ( $KBF_4$ ) djeluje kao aktivator [8].

Postupak se izvodi na sljedeći način: obrađeni komad se smješta u kutiju od vatrootpornog lima (debljine 3 do 5 mm) tako da ga okružuje sloj praška širine 10 do 20 mm sa svake strane (vidi

slika 23). Zatim se dodaje otprilike 100 mm ekrita ili, alternativno, iskorišteni prašak za boriranje kako bi se spriječio pristup kisika tijekom procesa. Kutija se zatim prekriva poklopcem s utegom. Pripremljena kutija s obratkom stavlja se u običnu komornu peć (bez zaštitne atmosfere) i zagrijava na temperaturu potrebnu za boriranje. Nakon odgovarajućeg vremena boriranja, kutija se izvadi i ohladi zajedno s peći, a po potrebi se može izvesti i naknadno direktno kaljenje.



Slika 23. Priprema obratka za boriranje u prašku [6, 8]

U situacijama kada trajanje boriranja nije predugo naravi, prašak za boriranje može se reciklirati i koristiti više puta. Pri ponovnom boriranju, potrebno je dodati 30 do 40 % svježeg praška u stari prašak te ga dobro izmiješati s recikliranim. Ova mješavina može se koristiti 5 do 6 puta. Međutim, u slučaju dugotrajnog boriranja (20 sati i više), nije preporučljivo koristiti reciklirani prašak. Prašak za boriranje se sastoji od tri glavne komponente: -inertne ispuhe postojeane na visokim temperaturama, aktivno sredstvo koje oslobađa bori aktivator koji potiče difuziju i ubrzava reakcije tijekom boriranja. Kao aktivna sredstva koja oslobađaju bor koriste se amorfni bor, ferobor ili borov karbid [6].



Boriranje u krutom sredstvu ima niz prednosti u odnosu na druge konvencionalne postupke boriranja, prije svega zbog svoje jednostavnosti koja ne zahtijeva specijaliziranu opremu. Dovoljna je komorna peć s mogućnošću ugrijavanja na temperaturu do 1000 °C. Osim toga, troškovi opreme i korištenih sredstava su manji u usporedbi s drugim boriranjima, a postupak ne generira otrovne plinove. Nedostatak ovog postupka leži u visokim temperaturama potrebnim za postizanje kraćih vremena boriranja. Ove visoke temperature mogu rezultirati povećanom krhkošću boridnog sloja, posebno uz stvaranje FeB i Fe<sub>2</sub>B faza na površini. Dodatno, troškovi energije za zagrijavanje i održavanje temperature, te odlaganje korištenog praška za boriranje, predstavljaju izazove u ovom postupku.

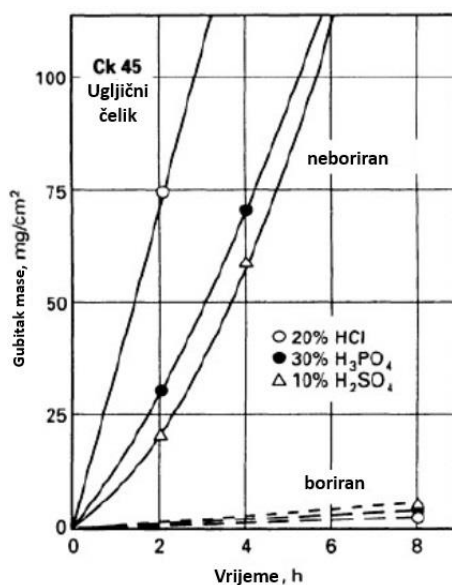
#### **3.2.4. Svojstva i primjena boriranih dijelova**

Boriranje predstavlja visoko učinkovit postupak poboljšanja svojstava materijala, često primjenjivan na željeznim materijalima, pružajući impresivne karakteristike koje čine ovu tehnologiju izuzetno atraktivnom. Slojevi boriranja karakteriziraju vrlo visoku tvrdoću u rasponu od 1500 do 2200 HV. Ova iznimno visoka tvrdoća čini ih otpornim na trošenje, eroziju i kavitaciju, čineći borirane materijale izuzetno dugovječnima u zahtjevnim uvjetima.

Borirani slojevi također pružaju dobru otpornost koroziji u mnogim kiselinama i lužinama, posebno u klorovodičnoj kiselini kao što je vidljivo na slici 24. Ova karakteristika čini borirane materijale prikladnima za različite industrijske primjene gdje postoji izloženost kemijskim agresijama.

Borirani materijali pokazuju izvrsna svojstva pri povišenim temperaturama, izdržavajući uvjete do 650°C. Ovo ih čini korisnima u situacijama gdje se materijal izlaže visokim temperaturama tijekom eksploatacije.

Njihov nizak koeficijent trenja od 0,4 pridonosi smanjenju trenja i habanja, poboljšavajući performanse u dinamičkim uvjetima. Također, debljina boriranih slojeva može varirati između 10 i 300 mikrometara, pružajući prilagodljivost u postizanju željenih karakteristika. Dodatno, borirani slojevi mogu se polirati, poboljšavajući estetski izgled i preciznost površine. Boriranje također rezultira smanjenom sklonosti hladnom zavarivanju, što je važna karakteristika u slučajevima gdje je postojanje tog problema nepoželjno. Zakaljivi čelici mogu dodatno poboljšati svoje svojstva nakon boriranja, pružajući dodatnu fleksibilnost u postizanju željenih performansi.



Slika 24. Korozivni učinak mineralnih kiselina na borizirani i neborizirani čelik C45 [14]

Zbog izvanrednih triboloških svojstava, posebno otpornosti na abrazijsko i adhezijsko trošenje, boriranje se primjenjuje na različite strojne elemente. To uključuje čahure, valjke, dijelove ventila, hidrauličke spojnice, vodilice, vratila, vretena, sapnice, vijčanike, zupčanike s kosim zupcima i druge komponente (vidi sliku 25).



Slika 25. Borirani zupčanici [15]

Također, boriranje se široko primjenjuje u izradi alata, obuhvaćajući dijelove uređaja za ekstruziju i injekcijsko brizganje, matrice za probijanje, prešanje i duboko vučenje, dijelove

kalupa, alate za savijanje, vučenje žice, valjke za oblikovanje, očvršćivanje i gravitiranje, te alate za prešanje. Primjeri boriranih alata za ekstrudiranje prikazani su na slici 26.



**Slika 26. Borirani alati za ekstrudiranje [16]**

## 4. Metode za ispitivanje tvrdoće i izgleda reznih oštrica

### 4.1. Ispitivanje tvrdoće ultrazvučnom sondom NOVOTEST UCI U1

Sonda tipa U1 (50 N) dimenzija  $\text{Ø}30 \times 140$  mm, s maksimalnom težinom od 250 grama, osigurava precizno mjerenje tvrdoće. Površina sonde ima hrapavost od  $2,5 \mu\text{m}$ , dok je polumjer zakrivljenosti 5 mm. Ova sonda je namijenjena za kontrolu proizvoda težih od 0,1 kg i debljine ne manje od 1 mm. Indentor kojim se utiskuje u materijal je dijamant.

Glavna karakteristika sonde je primjena opterećenja od 5 kgf (50 N) za mjerenje tvrdoće, a to opterećenje automatski kontrolira sonda. Sonda zadovoljava prosječne zahtjeve čistoće površine.

Najčešće se koristi za ispitivanje tvrdoće toplinski obrađenih i cementiranih dijelova poput osovina, turbina, zupčanika, zuba, zavara te zona pogođenih toplinom. Također, koristi se za mjerenje u utorima, na zubima, u utorima, na radijalnim površinama, te za mjerenje na lopaticama, unutarnoj površini cijevi i otvorima. Također uz uređaj postoji aplikacija kojom se mogu pratiti sva ispitivanja (slika 27).



Slika 27. NOVOTEST uređaj za ispitivanje tvrdoće i aplikacija za očitavanje tvrdoće [17]

#### 4.2. Ispitivanje tvrdoće metodom VICKERS HV1

U ispitivanju tvrdoće metodom Vickers, dijamantni indentor u obliku piramide s kvadratnom bazom i vrhom pod kutom od  $136^\circ$  se utiskuje u ispitivanu površinu pod određenim opterećenjem. Nakon utiskivanja, indentor ostavlja deformaciju u obliku kvadratne udubine, čije se dijagonale mjere radi određivanja tvrdoće (slika 28). Vickersova tvrdoća izračunava se kao kvocijent sile opterećenja i površine nagnutih površina unutar udubljenja (7). Pojednostavljeni izraz za izračun tvrdoće je sila opterećenja podijeljena površinom indentacije, a primijenjena sila opterećenja za HV1 iznosi 9,807N [18].

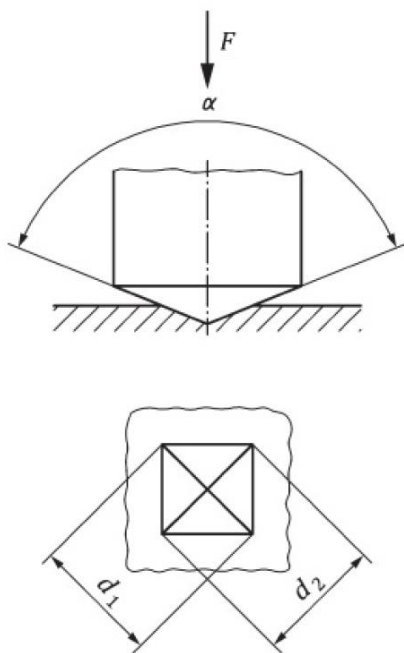
$$HV = \frac{1,8544F}{d^2} \quad (7)$$

Gdje je:

- $HV$  tvrdoća po Vickersu

- $F$  zadana sila opterećenja

- $d$  aritmetička sredina izmjerenih dijagonala otiska indentora.



Slika 28. Shematski prikaz Vickers indentora i otiska [18]

Pri mjerenju, ključno je da je indentor okomit na uzorak, da su površine uzorka planarne, ili ako to nije moguće, koristiti uređaj koji osigurava pravilan položaj uzorka. Kvaliteta površina također igra ključnu ulogu u točnosti mjerenja. Kod mikro tvrdoće, posebna pažnja se posvećuje hrapavosti površine zbog male veličine otiska, pa površina namijenjena za testiranje mikro tvrdoće mora biti pažljivo polirana. Važno je minimalno utjecati na obradu površine kako bi se očuvala točnost rezultata.

Metoda Vickers također nalazi primjenu u određivanju dubine slojeva ispod površine kod nitriranja i drugih postupaka modifikacije površine. Mjerenja dubine slojeva su standardizirana i obavljaju se s mikro opterećenjima. Udaljenost između otisaka je od velike važnosti kako bi se spriječilo međusobno djelovanje otisaka, gdje za čelike ta udaljenost iznosi tri dužine dijagonale. S obzirom na smanjenje tvrdoće prema unutrašnjosti, veličina otiska se povećava, te je stoga potrebno povećavati i udaljenost između njih. Efektivna dubina nitriranja definirana je kao udaljenost od površine do mjesta gdje je tvrdoća 50 HV u odnosu na tvrdoću jezgre. Ukupna dubina nitriranog sloja je veća od efektivne dubine, no obično se vizualno mjeri uz pomoć mikroskopije.

### **4.3. Svjetlosna mikroskopija**

Svjetlosna mikroskopija, ključna tehnika u analizi oštećenja materijala, omogućuje detaljan uvid u strukturu i karakteristike uzoraka na mikroskopskoj razini. Ova metoda istraživanja koristi vidljivo svjetlo za promatranje uzoraka, čime omogućuje preciznu analizu njihove morfologije, veličine i eventualnih oštećenja.

Primjenjiva u širokom spektru disciplina, svjetlosna mikroskopija se često koristi za analizu oštećenja na površini materijala. Oštećenja kao što su pukotine, abrazije ili defekti postaju jasnije vidljiva pod mikroskopom, što pomaže u razumijevanju uzroka i mehanizama oštećenja. Ovaj pristup omogućuje inženjerima, znanstvenicima i stručnjacima za materijale bolje razumijevanje performansi materijala te razvoj učinkovitih strategija održavanja i poboljšanja materijala.

---

Svjetlosna mikroskopija se ističe svojom sposobnošću pružanja visoke razlučivosti i kontrasta, što je iznimno bitno za pravilno dijagnosticiranje i analizu oštećenja. Ovaj neinvazivni pristup omogućuje temeljito ispitivanje uzoraka bez narušavanja njihovog integriteta, čime se osigurava cjelovita analiza oštećenja i potrebna temeljitost u znanstvenim istraživanjima.

# EKSPERIMENTALNI DIO



## 5. Priprema uzoraka i ispitivanja

### 5.1. Plan pokusa

U eksperimentalnom dijelu rada cilj je bio istražiti učinke različitih površinskih obrada na trošenje škara za orezivanje voćaka. U tu svrhu korištene su škare istog proizvođača izrađene od srednjeugličnog čelika u poboljšanom stanju s indukcijski kaljenom oštricom. Prvi par škara ostavljen je u izvornom stanju, bez dodatnih površinskih tretmana, te je korišten kao referentna skupina za usporedbu s drugim tretiranim uzorcima. Drugi par škara podvrgnut je procesu nitrokarburiranja dok je treći par škara izložen procesu boriranja.

Nakon provedenih površinskih obrada, sva tri para škara podvrgnuta su terenskom ispitivanju kako bi se utvrdilo njihovo ponašanje u rezidbi voćaka. Prilikom orezivanja voćaka, cilj je bio doseći 200 rezova sa svakim škarama. Nakon svakih 50 rezova na pojedinim škarama, evidentirana je promjena na samoj oštrici i osjećaj rezanja. Na kraju eksperimenta, trošene površine škara detaljno su analizirane kako bi se usporedili učinci toplinskih obrada na smanjenje trošenja.

#### 5.1.1. Nitrokarburiranje

Nitrokarburiranje u solnoj kupki Tenifer provedeno je na temperaturi od 580 °C u trajanju od 2 sata, nakon čega su škare ohlađene u vodi. Ova temperatura nitrokarburiranja utjecala je na dodatno popuštanje jezgre škara, jer prelazi uobičajene temperature popuštanja koje se koriste u procesu poboljšavanja. Na slici 29 prikazna je solna kupka TENIFER tijekom nitrokarburiranja škara i ostalih dijelova i alata u šarži u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 29. Solna kupke TENIFER u radu

### 5.1.2. Boriranje

Proces boriranja u prašku DURBORID G proveden je na temperaturi od 950 °C u metalnom sanduku u komornoj električnoj peći "Pika" s automatskom regulacijom temperature u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Peć može postići maksimalnu radnu temperaturu od 1150 °C u volumenu od 210 litara (slika 30).



**Slika 30. Komorna elektrootporna peć „Pika“**

Postupak boriranja odvijao se u nekoliko faza. Prvo je peć zagrijana na 950°C tijekom jednog sata kako bi se osigurala ujednačena temperatura u cijeloj komori. Nakon postizanja željene temperature, škare su stavljene u peć i držane na 950°C dodatnih jedan sat kako bi se osiguralo ravnomjerno zagrijavanje svih dijelova. Zatim je uslijedio proces boriranja, pri čemu su škare zadržane na temperaturi od 950°C tijekom dva sata, što je omogućilo difuziju bora u površinski sloj škara, čime se povećala njihova tvrdoća i otpornost na trošenje. Po završetku boriranja, škare su polako hladene u kontroliranim uvjetima kako bi se izbjegla pojava termalnog stresa i deformacija.

## 6. Rezultati mjerenja tvrdoće oštrice

### 6.1. Rezultati mjerenja tvrdoće HV1 metodom

Tvrdoća površine oštrice škara u polaznom stanju određena je metodom Vickers. Ispitivana je isključivo površinska tvrdoća oštrice indukcijski kaljenih škara, koristeći tvrdomjer Wilson-Wolpert Tukon 2100B, prikazan na slici 31 u Laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Opterećenje primijenjeno tokom mjerenja iznosilo je 9,87 N, što odgovara metodi Vickers HV1.



Slika 31. Tvrdomjer Wilson-Wolpert Tukon 2100B

Na oštrici indukcijski kaljenih škara je izvršeno 6 utisaka indentorom.

Tablica 3. Tvrdoća oštrice indukcijski kaljenih škara

Redni broj utiska	1	2	3	4	5	6
Tvrdoća, Vickers (HV)	607	732	617	773	753	622

U tablici 3 prikazano je šest otisaka na površini oštrice indukcijski kaljenih škara. Srednja vrijednost tvrdoće površinski kaljene oštrice škara iznosi 683 HV, što odgovara tvrdoći od 58 HRC do 59 HRC.

## 6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće NOVOTEST UCI U1 metodom

Osim metode Vickers za mjerenje tvrdoće oštrica induksijski kaljenih, nitrokarburiranih i boriranih škara korištena je metoda s ultrazvučnom sondom NOVOTEST UCI U1. Na svim oštricama je izvršeno 10 otisaka indenterom U1 uz silu od 5 N. U računalnom programu izmjerene vrijednosti tvrdoće prikazane su prema skali Rockwell C (HRC).

U tablici 4 prikazane su vrijednosti deset utisaka za induksijski kaljene, nitrokarburirane i borirane škaru, te prosječne vrijednosti tvrdoće za različite vrste toplinske obrade. Induksijski kaljene škaru pokazale su prosječnu tvrdoću od 55,7 HRC, dok su škaru podvrgnute nitrokarburiranju imale znatno nižu prosječnu tvrdoću od 24,9 HRC. S druge strane, borirane škaru postigle su najveću prosječnu tvrdoću od 60,4 HRC.

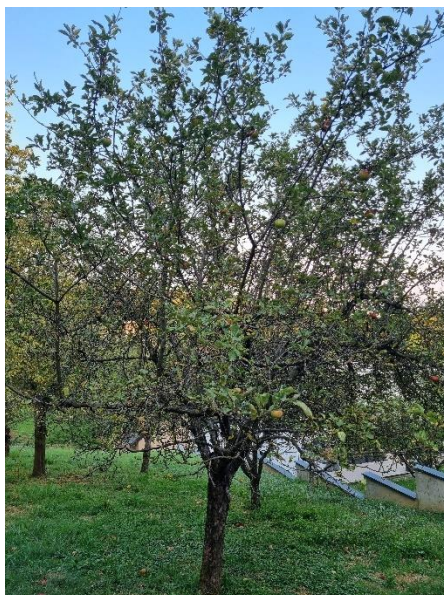
**Tablica 4. Tvrdoća oštrice induksijski kaljenih, nitrokarburiranih i boriranih škara**

Redni broj utiska	Tvrdoća induksijski kaljenih škara (HRC)	Tvrdoća nitrokarburiranih škara (HRC)	Tvrdoća boriranih škara (HRC)
1	57,4	23,2	59,5
2	50,7	29,4	60,6
3	54,7	18,4	61,6
4	59,1	24,6	61,7
5	58,2	27,3	60,9
6	56,3	21,8	57,9
7	49,7	26,6	62,0
8	56,4	25,4	62,5
9	57,6	22,3	58,3
10	56,9	30,8	59,1
Srednja tvrdoća			
	55,7±2,98	24,9±3,54	60,4±1,53

Ovi rezultati ukazuju na to da je proces nitrokarburiranja uzrokovao smanjenje površinske tvrdoće škara u usporedbi s indukcijски kaljenim škarama. Oštrice su tijekom nitrokarburiranja izgubile dio tvrdoće koju su prvobitno imale nakon indukcijske obrade. Nasuprot tome, proces boriranja je povećao tvrdoću oštrica, čime su borirane škarе postigle najbolje rezultate u ispitivanju tvrdoće.

### 6.3. Rezultati trošenja u terenskom ispitivanju

U okviru terenskog ispitivanja, provedeno je testiranje svih triju uzoraka škara na stablu jabuke (slika 32), s ciljem da se procijeni stupanj trošenja nakon stvarnog korištenja. Kako bi se osigurali što sličniji uvjeti za sve testirane uzorke, obrezivanje je obavljeno na izdancima grana, jer se u stvarnim uvjetima obrezivanja voćaka najčešće režu upravo takvi izdanci.



Slika 32. Drvo jabuke

Prije početka testiranja, odlučeno je da će se obrezivati izdanci sličnih dimenzija kako bi se minimizirale varijacije u debljini materijala i tako osigurali usporedivi rezultati. U tu svrhu, najprije je određen prosječni presjek izdanka koji će se koristiti u eksperimentu. Za ovo određivanje, izrezano je oko 50 izdanaka pomoću škara koje nisu uključene u eksperimentalni dio istraživanja. Nakon toga, na deset odabranih izdanaka izvršena su mjerenja najdebljeg i najtanjeg presjeka, kako bi se izračunala prosječna debljina izdanaka. Dobiveni rezultati mjerenja navedeni su u tablici 5, koja prikazuje najdeblji i najtanji presjek za svaki od deset

izdanaka. Na temelju ovih podataka izračunata je prosječna debljina izdanaka, koja iznosi 7,55 mm.

**Tablica 5. Debljina izdanaka**

Redni broj izdanka	Najtanji presjek (mm)	Najdeblji presjek (mm)	Prosječna debljina (mm)
1	6	11	8,5
2	5	11	8
3	5	8	6,5
4	7	10	8,5
5	5	8	6,5
6	4	9	6,5
7	6	10	8
8	5	10	7,5
9	6	11	8,5
10	5	9	7

U nastavku eksperimentalnog dijela, škarice koje su korištene za ispitivanje označene su oznakama „A“, „B“ i „C“. Škarice A predstavljaju izvorne, indukcijski kaljene škarice, škarice B su podvrgnute procesu nitrokarburiranja, dok su škarice C borirane. Ova tri uzorka škara podvrgnuta su jednakim uvjetima testiranja kako bi se osigurala dosljednost u ispitivanju i omogućila jasna usporedba među njima.







Ispitivanje je provedeno na izdancima stabla jabuke, gdje su rezovi ručno izvođeni pomoću svih škara. Na svakom uzorku, rezovi su se vršili svakih približno 3 cm, pri čemu su škarice koristile za izvođenje ukupno 50 uzastopnih rezova na istim uvjetima. Isti postupak ponovljen je za škarice A, B i C. Cilj testiranja bio je pratiti i dokumentirati vizualne promjene u ošttrini, čistoći reza, te ukupnom ponašanju škara tijekom obrezivanja.

Svaki par škara koristio se za izvođenje ukupno 200 rezova na izdancima, podijeljenih u četiri serije po 50 rezova. Tijekom i nakon svake serije, pažljivo su pregledani rezultati rezanja kako

bi se uočile razlike u kvaliteti reza i stupnju trošenja svake vrste škara. Proces je uključivao i fotografiranje svakog para škara nakon određenog broja rezova kako bi se dokumentirale moguće promjene u svojstvima i izgledu škara. Ovime se omogućila detaljna analiza ponašanja škara A, B i C te njihovih sposobnosti održavanja oštine i kvalitete reza tijekom dugotrajnog korištenja.

U tablici 5 je prikazano stanje svih škara nakon određenog broja rezova. U početnom stanju možemo vidjeti netaknutost škara A, B i C.

**Tablica 5. Stanje oštrica škara u terenskom ispitivanju**

Broj rezova	Polazno stanje	Nitrokarburirano stanje	Borirano stanje
0	 A	 B	 C
50	 A	 B	 C

Tablica 5. Stanje oštrica škara u terenskom ispitivanju

100			
150			
200			

Tijekom ispitivanja škara A, B i C zabilježeni su različiti rezultati. Škare A bile su tupe od početka, ali nisu pokazivale znakove oštećenja nakon 50 rezova. Škare B bile su oštre, no već nakon 10 rezova došlo je do pucanja oštrice, a nakon 50 rezova oštećenje se dodatno pogoršalo. Škare C bile su oštrije od škara A, a nakon 50 rezova oštrica je ostala neoštećena i bez znakova trošenja.

Nakon 100 rezova, škare A ostale su netaknute, iako je došlo do blagog otupljivanja oštrice. Škare B su zadržale svoju oštrine, ali oštećenja na oštrici otežavaju pravilno rezanje grana. S druge strane, škare C zadržale su svoju oštrinu, režući jednako učinkovito kao na samom početku ispitivanja.

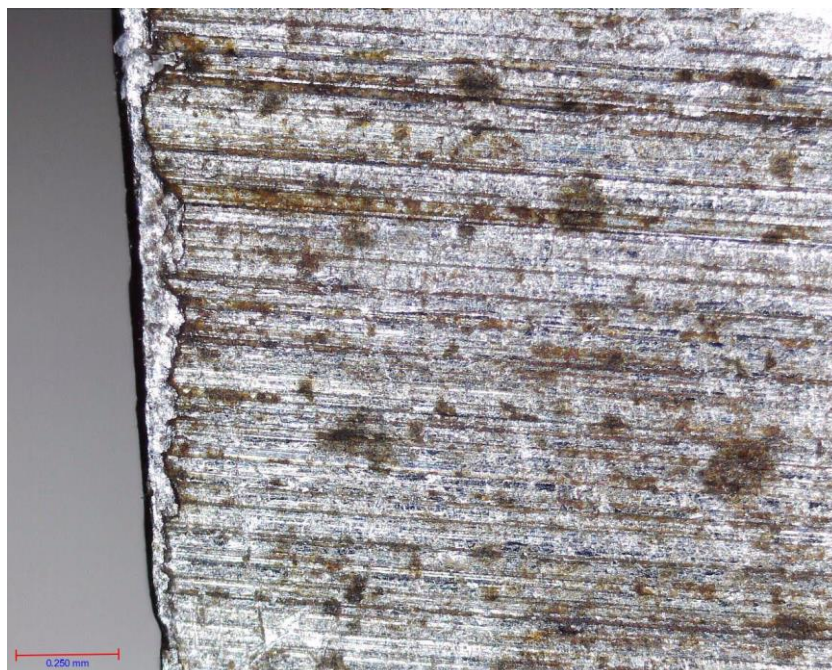


Nakon 150 rezova, na škarama A nisu primijećene značajne promjene, ali se osjeća smanjenje oštine. Škare B, iako osjetno oštrije od škara A, postale su teško upotrebljive zbog znatno oštećene oštrice. Škare C zadržale su svoju oštrinu i ostale ne okrnute.

Nakon 200 rezova nisu uočene značajne promjene u odnosu na rezultate nakon prvih 50 rezova. Sve škare su pokazale blago zatupljivanje, pri čemu je ono najizraženije kod škara A. Iako su škare B zadržale oštrinu, više nisu upotrebljive zbog potpune devastacije desne strane oštrice. S druge strane, škare C su se pokazale kao najpouzdanije, zadržavši oštrinu i funkcionalnost tijekom cijelog ispitivanja, te su se izdvojile kao najbolje u ovom kratkom testu.

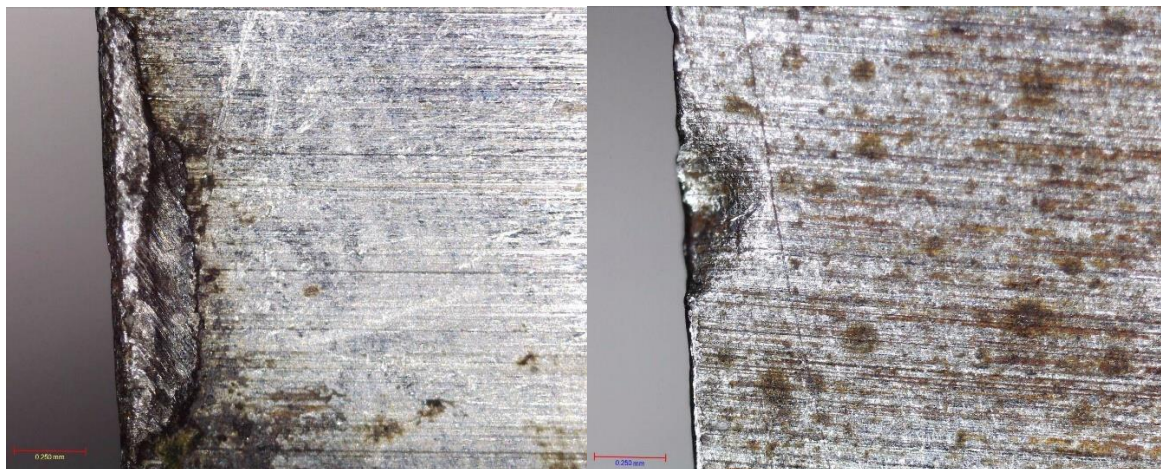
#### 6.4. Analiza trošene površine

Za proučavanje oštećenja na oštrici škara korišten je USB svjetlosni mikroskop s kamerom Toolcraft Digimicro Profi s kontinuirano promjenljivim povećanjem od 20:1 do 200:1 spojen na prijenosno računalo i računalni program Micro Capture Plus. Analizom slike 33 ustanovljeno je da se na škarama A oštrica počela otupljivati, pri čemu su okrnutosti oštrice većinom veličine desetine milimetra. Ova mikrooštećenja ukazuju na početne faze degradacije oštine alata.



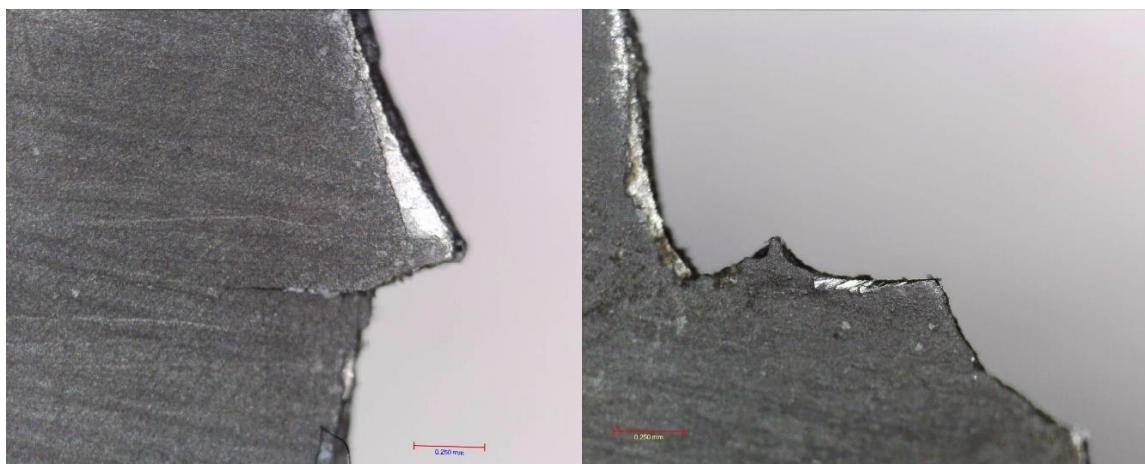
Slika 33. Uvećana površina oštrice škara A

Daljnijim pregledom oštrice na slici 34, primijećena su veća okrhnuća širine oko jedne četvrtine milimetra i duljine nekoliko milimetara.



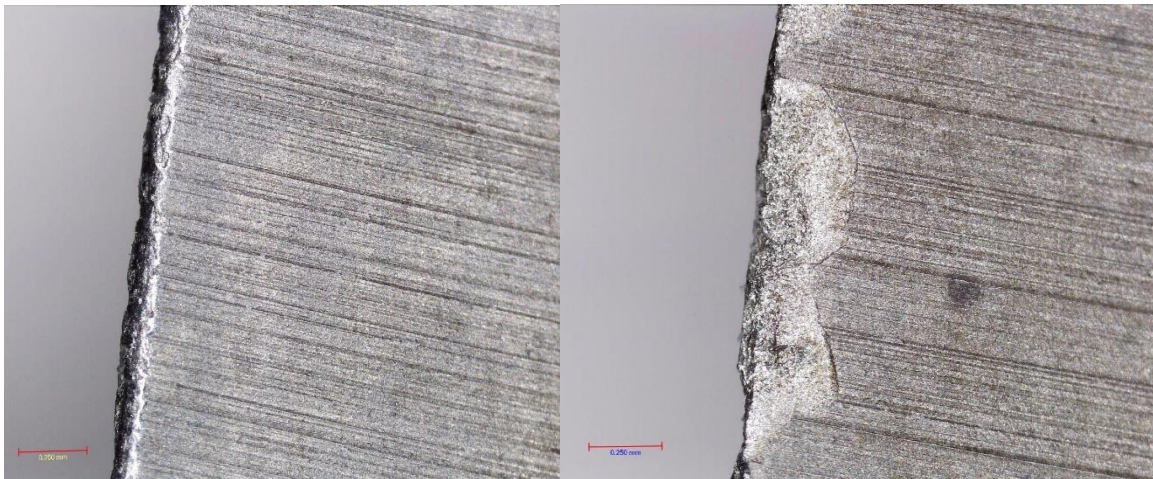
**Slika 34. Veća oštećenja oštrice na škarama A**

Kod škara B, na jednom dijelu oštrice primijećeno je listanje sloja nitrida, dok se na srednjem dijelu oštrice otkidaju komadići veličine nekoliko milimetara. Ovakva oštećenja ukazuju na to da je oštrica, odnosno cijele škare, oslabljena tijekom procesa nitrokarburiranja (slika 35).



**Slika 35. Uvećana površina oštrice škara B**

Kod škara C na slici 36 uočeno je izraženo listanje sloja borida, pri čemu su ta oštećenja veličine čak nekoliko milimetara. Unatoč tome, unutrašnjost oštrice ostala je dobro očuvana, bez vidljivih okrhnutosti izvornog materijala, što ukazuje na solidnu otpornost jezgre.



**Slika 36. Uvećana površina oštrice škara C**

## 7. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je poboljšanje otpornosti na trošenje ručnih škara za obrezivanje voćaka primjenom različitih postupaka toplinske obrade površine. Istraživanje je obuhvatilo proces nitrokarburiranja u solnoj kupki TENIFER i boriranje u prašku. Na temelju provedenog ispitivanja i analize triju različitih tipova škara, može se zaključiti da je otpornost na trošenje škara značajno ovisna o stanju oštrice i procesu toplinske obrade površine. Iz rezultata terenskog ispitivanja orezivanja grana jabuke i analize istrošenih oštrica ručnih škara zaključuje se sljedeće:

- Indukcijski kaljene škarke pokazale su postupno zatupljivanje nakon većeg broja rezova, ali bez značajnih mehaničkih oštećenja.
- Nitrokarburirane škarke, iako su zadržale oštrinu, pretrpjele su ozbiljna oštećenja oštrice zbog listanja nitrida i otkidanja materijala, što ukazuje na pojavu omekšavanja podloge u postupku nitrokarburiranja u solnoj kupci.
- Borirane škarke su pokazale najbolju otpornost, unatoč listanju boridnog sloja, pri čemu je jezgra ostala neoštećena, što im je omogućilo da zadrže funkcionalnost tijekom cijelog ispitivanja.

Na temelju navedenih rezultata, borirane škarke su se istaknule kao najbolji izbor u provedenom ispitivanju, zbog optimalne ravnoteže između očuvanja oštrine i mehaničke izdržljivosti.

**LITERATURA**

- [1] <https://www.duebuoiaagriculture.com/collections/pruning-shears-and-secateurs/products/double-cutting-blades-secateurs-with-alluminium-handle-db-135-20> (05.07.2024.)
- [2] <https://100033124.weebly.com/mechanism-description.html> cksinfo.com. (06.07.2024.)
- [3] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [4] Grilec, K., Jakovljević, S., Marić, G.: Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017
- [5] Matijević, B. i Landek, D.: Predavanja iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, FSB, Zagreb, 2020.
- [6] Matijević, B. i Landek, D.: Podloge za vježbe iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, FSB, Zagreb, 2020.
- [7] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2. izdanje, Zagreb, 2015
- [8] Krumes, D.: Toplinska obrada, Sveučilište J.J. Strossmayer u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 2000
- [9] Landek, D.: Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada“, FSB, Zagreb, 2016.
- [10] Landek, D.: Podloge za vježbe iz kolegija „Toplinska obrada“, FSB, Zagreb, 2016.
- [11] Marušić, K., Otmačić, H., Landek, D., Cajner, F., Stupnišek-Lisac, E.: Modification of carbon steel surface by the Tenifer process of nitrocarburizing and post-oxidation, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 3415–3421
- [12] Brinke, T. Crummenauer, J., Rainer, H., Oppel, W.: Plasma-Assisted Surface Treatment, Verlag moderne industrie, Munich, 2006
- [13] [https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-borided-layer-on-the-EN-C15-steel-consisting-of-FeB-dark-and-Fe-2-B\\_fig1\\_224829171](https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-borided-layer-on-the-EN-C15-steel-consisting-of-FeB-dark-and-Fe-2-B_fig1_224829171) slika 4, Dimitar Krastev, (08.07.2024.)
- [14] [https://www.researchgate.net/figure/Corroding-effect-of-mineral-acids-on-boronized-and-unboronized-Ck45-steel\\_fig3\\_224829171](https://www.researchgate.net/figure/Corroding-effect-of-mineral-acids-on-boronized-and-unboronized-Ck45-steel_fig3_224829171) slika 7, Dimitar Krastev, (08.07.2024.)
- [15] <https://www.engineeringnews.co.za/article/coating-process-provides-significant-wear-and-corrosion-protection-2015-07-17> slika 1, Kimberley Smuts, (08.07.2024.)
- [16] <https://www.agir-technologies.com/en/1-3-cable-extrusion-tools.html> (08.07.2024.)
- [17] <http://novotest.biz/types-of-uci-probes/> (08.07.2024.)

---

[18] Franz, M. Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1998