

Povišenje otpornosti na mikroabrazijsko trošenje austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 boriranjem u prašku

Mađerić, Lucija

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:158823>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lucija Mađerić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Lucija Mađerić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru Darku Landeku za svu pomoć i pristupačnost tijekom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima što su mi bili potpora kroz sve uspjehe i neuspjehe tokom mog školovanja.

Lucija Mađerić



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: **Lucija Maderić** JMBAG: **0035220571**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Povišenje otpornosti na mikroabrazijsko trošenje austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 boriranjem u prašku**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Increasing resistance to micro-abrasion wear of austenitic stainless steel X5CrNiMo17-12-2 by powder boronizing**

Opis zadatka:

Boriranjem u prašku ili pasti se proizvode površinski slojevi dobrih triboloških, korozivskih i eksploatacijskih svojstava. Vrsta borida i debljina boridnog sloja ovise o vrsti čelika i parametrima boriranja te naknadnoj toplinskoj obradi. U radu treba opisati svojstva i mikrostrukturu borida na nehrđajućim čelicima te navesti tipične primjere primjene boriranja. Za karakterizaciju svojstava boridnoga sloja treba opisati metode ispitivanja hrapavosti i mikrotvrdoće površine te ispitivanja otpornosti na mikroabraziju slobodno rotirajućom kuglicom.

U eksperimentalnom dijelu radu treba predložiti parametre boriranja u prašku ispitnih uzorka od austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 kojima će se postići tri različite debljine boridnog sloja. Na boriranim uzorcima provesti ispitivanja hrapavosti i mikrotvrdoće površine te odrediti debljinu boridnog sloja i brzinu mikroabrazijskog trošenja. Na temelju rezultata ispitivanja opisati utjecaj parametara boriranja na svojstva površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Darko Landek

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.

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. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI	2
2.1. Čelik X5CrNiMo17-12-2	4
3. BORIRANJE	6
3.1. Postupci boriranja	6
3.2. Boridni sloj	7
3.2.1. Mehanizam rasta boridnog sloja	7
3.2.2. Kinetika rasta boridnih slojeva	8
3.2.3. Željezni boridi	9
3.2.3.1. Metode sprječavanja nastanka FeB faze	11
3.2.4. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva borida	12
3.2.5. Boriranje u prašku	13
3.2.6. Svojstva boridnih slojeva	15
3.2.6.1. Tvrdća i otpornost na trošenje	15
3.2.6.2. Otpornost borida na visokim temperaturama	16
3.2.6.3. Otpornost boridnog sloja na eroziju	17
3.2.6.4. Kemijska otpornost boridnog sloja	18
3.2.7. Primjena boridnih slojeva	19
4. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA MIKROABRAZIJU SLOBODNO ROTIRAJUĆOM KUGLICOM	20
5. ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE	22
6. ISPITIVANJE MIKROTVRDOĆE	24
6.1. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom	24
6.2. Ispitivanje tvrdoće Vickers metodom	25
6.3. Mjerenje tvrdoće metodom po Rockwellu C	26
7. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA	28
7.1. Ispitni uzorci i plan pokusa	28
7.2. Ispitivanje mikrotvrdoće	31
7.3. Ispitivanje hrapavosti površine	34
7.4. Mikrostrukturalna analiza boriranih uzoraka	36
7.5. Ispitivanje otpornosti borida na mikroabraziju	39
8. ZAKLJUČAK	44

LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) 100% austenit, b) austenit i delta ferit [5].....	3
Slika 2.	Rast boridnih slojeva uvjetovan brzinom kemijskih reakcija [10].....	8
Slika 3.	Rast boridnog sloja uvjetovan difuzijom [10]	8
Slika 4.	Kristalne rešetke željeznih borida [13].....	10
Slika 5.	Razdvajanje boridnog sloja [9]	11
Slika 6.	Nastanak FeB faze na vrhu oštrice alata [9]	12
Slika 7.	Otkrnuće boridnog sloja na oštrom rubu uzorka [9]	12
Slika 8.	Utjecaj legirnih elemenata na debljinu boridnog sloja [9]	13
Slika 9.	Utjecaj boridnog sredstva na sastav faza boridnog sloja [9]	14
Slika 10.	Utjecaj boriranja na trošenje [9].....	16
Slika 11.	Utjecaj temperature na tvrdoću [15].....	16
Slika 12.	Erozijsko ispitivanje neobrađenog i boriranog 21Mn5 (L80) čelika [16].....	17
Slika 13.	Erozijsko ispitivanje neobrađenog i boriranog C22 čelika [16]	18
Slika 14.	Utjecaj kiselina na čelik C45 [9].....	18
Slika 15.	Jedinični događaj mikroabrazije [17]	20
Slika 16.	Kalotester sa slobodno rotirajućom kuglicom [20].....	21
Slika 17.	Shematski prikaz ispitivanja kalotestom [18].....	21
Slika 18.	Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednje aritmetičko odstupanje R_a [21]	22
Slika 19.	Procjena hrapavosti koristeći srednju visinu neravnina R_z [21].....	23
Slika 20.	Brinellova metoda [22].....	24
Slika 21.	Vickersova metoda [22].....	25
Slika 22.	Rockwell metoda [22]	27
Slika 23.	3D model ispitnog uzorka.....	28
Slika 24.	Elektrootporna peć s automatskom regulacijom temperature.....	28
Slika 25.	Položaj uzoraka u posudi za boriranje.....	29
Slika 26.	Shema uzoraka u posudi za boriranje.....	29
Slika 27.	Dijagram postupka boriranja	30
Slika 28.	Uzorci od čelika X5CrNiMo17-12-2 nakon boriranja u prašku DURBORID G ..	31
Slika 29.	Tvrdoća površine boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2.....	32
Slika 30.	Otisci nastali mjerenjem mikrotvrdoće po dubini na boriranom uzorku B21	32
Slika 31.	Dijagram mikrotvrdoće po dubini boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2	33
Slika 32.	Uređaj za mjerenje hrapavosti TIME 3202	34
Slika 33.	Usporedba srednjih rezultata ispitivanja hrapavosti površine ne boriranog i boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2.....	36
Slika 34.	Uzorci boriranog čelika X5CrNiMo17-12-2 pripremljeni za metalografsku analizu	37
Slika 35.	Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B21	37
Slika 36.	Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B31	38
Slika 37.	Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B41 s pojavom mikropukotina	38
Slika 38.	Debljina boridnog sloja na čeliku X5CrNiMo17-12-2.....	39
Slika 39.	Kalota na uzorku B21 trošenom 10 s	40
Slika 40.	Uzorak B21 trošen 20-60 s	40
Slika 41.	Uzorak B21 trošen 90 s	40
Slika 42.	Uzorak B31 trošen 10-90 s	41
Slika 43.	Uzorak B41 trošen 10-90 s	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [5]	2
Tablica 2. Kemijski sastav X5CrNiMo17-12-2 [5]	4
Tablica 3. Svojstva željeznih borida [12]	10
Tablica 4. Tvrdće toplinski obrađenih čelika	15
Tablica 5. Oznake polaznih i boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2	30
Tablica 6. Mikrotvrdoće HV0,5 boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2	31
Tablica 7. Mikrotvrdoća po dubini površinskog sloja na uzorcima od čelika X5CrNiMo17-12-2	33
Tablica 8. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na polaznom uzorku i boriranim uzorcima	34
Tablica 9. Rezultati ispitivanja otpornosti boriranih uzoraka na mikroabraziju	42
Tablica 10. Rezultati analize dubine i volumena kalote u boriranom sloju	42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2/s	Konstanta kemijskog procesa neovisna o temperaturi
d	mm	Debljina sloja
d	mm	Promjer baze kuglinog otiska
d	mm	Srednja vrijednost dijagonale baze piramide
D	mm	Promjer kuglice
F	N	Sila
F_N	N	Normalna komponenta sile
F_t	N	Tangencijalna komponenta sile
ρ	°	Kut
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HRC, HRB	-	Tvrdoća po Rockwellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
h	mm	Dubina kalote
K	mm^2/s	Konstanta brzine rasta boridnog sloja
l	mm	Mjerna duljina
m	g	Profil neravnine
n	-	Broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž l
Q	kJ/kmolK	Energija aktivacije
R	kJ/kmol	Plinska konstanta
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_{max}	μm	Ukupna visina profila
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_{3\sigma}, R_z$	μm	Srednja visina neravnina
S	mm^2	Površina otiska
t	s	Vrijeme
T	K	Temperatura
V	mm^3	Volumen kalote
x	μm	Dužina uzduž mjerne duljine
x	mm	Udaljenost od površine
$y(x), y_i$	μm	Visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu
y_{pi}	μm	Visina i-tog najvišeg vrha
y_{vi}	μm	Dubina i-te najniže udoline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisan je postupak boriranja u prašku te karakteristike boridnog sloja. Objasnjeni su utjecaji na mikrostrukturu, debljinu i svojstva boridnih slojeva. Definirani su austenitni čelici te je opisan austenitni nehrđajući čelik X5CrNiMo17-12-2. Opisane su metode za ispitivanje hrapavosti površine, mikrotvrdoće te otpornosti na mikroabraziju.

U ekperimentalnom dijelu rada opisan je postupak pripreme i provođenja postupka boriranja čelika X5CrNiMo17-12-2 s različitim trajanjima boriranja. Nakon boriranja, provedena je analiza mikrotvrdoće i hrapavosti površine te debljine i mikrotvrdoće boridnog sloja. Provođenjem ispitivanja slobodnom rotirajućom kuglicom ispitana je otpornost boridnog sloja na mikroabraziju.

Ključne riječi: boriranje, boridni sloj, mikroabrazija, austenitni nehrđajući čelik

SUMMARY

In the theoretical section, the process of powder boriding and the characteristics of boride layers were described. Impacts on the microstructure, thickness and properties of the boride layers were explained. Austenitic steels were defined and the austenitic stainless steel X5CrNiMo17-12-2 was described. Methods for surface roughness testing, hardness testing and microabrasion wear testing were described.

In the experimental part, the procedures for preparing and executing the boriding process of the X5CrNiMo17-12-2 steel with varying times of boriding were described. After boriding, the analysis of the hardness and roughness of the surface and thickness and hardness of the boride layers were performed. Using the free ball method, the microabrasion wear resistance was tested.

Key words: boriding, borided layers, microabrasion wear, austenitic stainless steel

1. UVOD

Inženjerstvo površina vuče korijene još iz antike kada su u Grčkoj i Kini koristili čvrste organske materijale za povećanje tvrdoće materijala. No, tek u 20. stoljeću s izumom električne energije počele su se razvijati moderne tehnologije obrade površine korištenjem laserskog snopa, plazme i ionskih snopova iz čega se razvilo inženjerstvo površina kakvo danas poznajemo. [1]

Inženjerstvo površina je znanstvena disciplina koja se bavi modificiranjem i prevlačenjem površinskih dijelova konstrukcijskih elemenata i alata od metala, legura, tehničke keramike, polimera i kompozita kako bi se poboljšala njihova eksploatacijska svojstva. Postoje postupci prevlačenja i postupci modificiranja površina. Primjenom postupaka prevlačenja nanosi se prevlaka željenih svojstava na obrađenu površinu konstrukcijskog dijela, dok se postupcima modificiranja mijenja sastav pri površini uzorka kako bi se dobila željena svojstva. Danas je u primjeni velik broj postupaka površinske obrade koji se dijele u nekoliko skupina: toplinsko – kemijski postupci, postupci u plazmi, postupci taloženja iz parne faze, postupci elektrolitskog nanošenja, postupci dobivanja karbidnih slojeva u solnoj ili fluidiziranoj kupki te kratkotrajni postupci visoke gustoće energije. Inženjerstvo površina primjenjuje se u automobilskoj, svemirskoj, biomedicinskoj industriji i dr. [2]

Neki od mnogobrojnih postupaka modificiranja površine su nitriranje, karburiranje, karbonitriranje i boriranje koje je i tema ovog rada gdje će se istražiti utjecaj trajanja boriranja na svojstva površine i otpornost na mikroabraziju.

2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Austenit je visokotemperaturni oblik željeza koji nastaje pri temperaturama između 910°C i 1400°C. Kako bi naziv austenitni čelik bio opravdan mora postojati neki udio ugljika u leguri, inače je riječ o gama željezu. Odnosno, austenit je kristal mješanac željeza i ugljika koji kristalizira plošno centriranom kubičnom (FCC) rešetkom. Austenit je nemagnetičan i može biti postojan na sobnoj temperaturi uz dodatak određenih legirnih elemenata među kojima je nikal najčešći.

Da bi čelici bili klasificirani kao nehrđajući, oni u svom kemijskom sastavu moraju sadržavati minimalno 10,5% kroma, no austenitni čelici sadrže najmanje 15% kroma. Svaki dodatni legirni element ima svoju ulogu za poboljšavanje pojedinog svojstva, mikrostrukture ili cijene.

Metastabilni austenit transformira u martenzit i hlađenjem i deformacijom, a s obzirom da je temperatura početka pretvorbe austenita u martenzit niža od sobne temperature potrebno je osigurati stabilnost austenita pri nižim temperaturama. Svi komercijalni legirni elementi stabiliziraju austenit, pa čak i oni koji prilikom solidifikacije stvaraju ferit. Nikal, dušik i bakar su najčešći legirni elementi koji potiču stvaranje austenita. Uz to što promiču austenitnu strukturu, nikal povisuje otpornost na koroziju, a dušik povisuje čvrstoću na sobnoj i niskim temperaturama. Tablica 1. prikazuje masene udjele ugljika i najvažnijih legirnih elemenata u austenitnim nehrđajućim čelicima.

Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [5]

Element	Maseni udio, %
krom	16 do 26
nikal	8 do 35
mangan	1 do 2 (4 do 15,5)
silicij	0,5 do 3
molibden	do 2
dušik	do 0,15
titan i niobij	do 0,2
ugljik	0,02 do 0,08 (0,1)

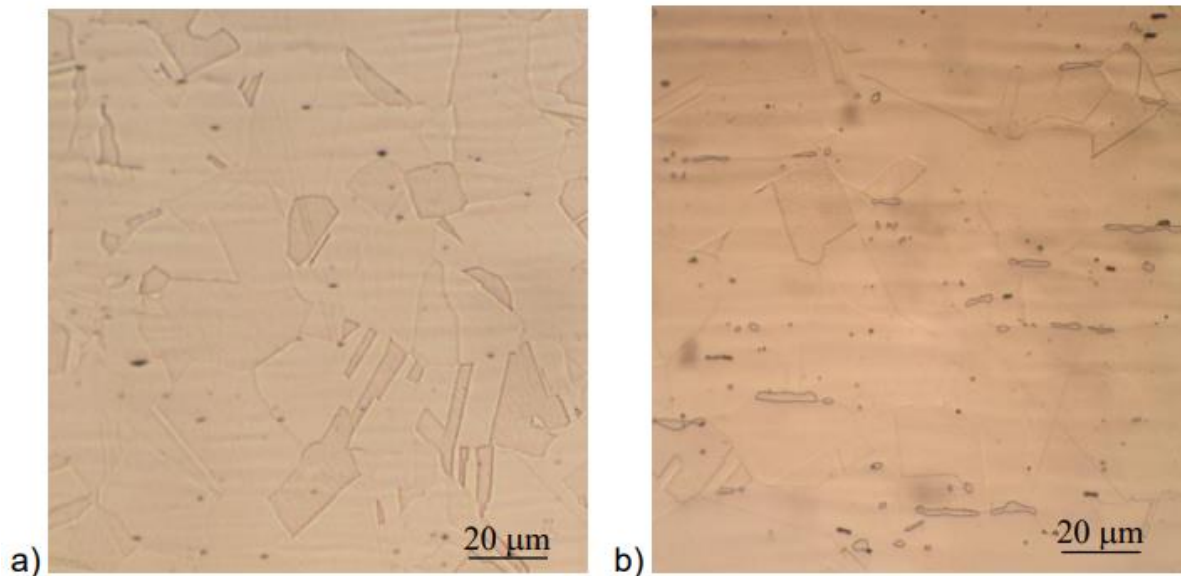
Austenitni nehrđajući čelici mogu sadržavati do 0,15% ugljika. Ugljik se prvenstveno smatra nečistoćom, a ne legirnim elementom, te mogu nastati štetni karbidi $M_{23}C_6$ gdje M označava prvenstveno krom, a potom i željezo. Nastanak ovih karbida se sprječava smanjenjem udjela ugljika te legiranjem jakim karbidotvorcima (Nb, Ti), a također se poboljšava i korozijska

otpornost. No ugljik povišuje otpornost na puzanje, stoga je potreban mali udio u čeliku. Austenitne čelike se ne može očvrstnuti toplinskom obradom, nego se očvršćuju hladnom deformacijom. Austenitni čelici imaju odlična svojstva. Izrazito im je dobra oblikovljivost i zavarljivost, te odlična duktilnost i žilavost, a postižu i značajnu istezljivost u vlačnom ispitivanju.

Otpornost na koroziju je direktno povezana sa sklonošću formiranja pasivnog filma na površini austenitnih čelika. Pasivnost je formiranje tankog sloja (nekoliko nanometara debelog) stabilnog oksida ili hidroksida niske ionske permeabilnosti na površini. Zbog niske permeabilnosti, sloj ne može rasti te potrošnja osnovnog metala usporava, a korozija nestaje. Krom je element koji pasivnom filmu daje stabilnost. Zbog ovog filma, austenitni nehrđajući čelici ne samo da su otporni na opću koroziju, nego su otporni i na pitting te pukotinsku koroziju. Ta sklonost stvaranja stabilnog permeabilnog prijanjajućeg oksida daje austenitnom čeliku izvrsnu otpornost na oksidaciju.

Kemijski sastav i termomehanička obrada austenitnih čelika podešavaju se kako bi im mikrostruktura na sobnoj temperaturi bila potpuno austenitna ili austenitna s malim udjelom feritne faze. Na slici 1.a) prikazana je mikrostruktura čelika sa stopostotnom austenitnom fazom, a na slici 1.b) je mikrostruktura austenitnog čelika s malim udjelom visokotemperaturnog (delta) ferita. Delta ferit je vidljiv u obliku trakastih nakupina usmjerenih u smjeru valjanja. Prisutnost delta ferita nije nepoželjna, no može smanjiti duktilnost i žilavost austenitnih čelika u određenim uvjetima.

Pogreška! Izvor reference nije pronađen.



**Slika 1. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika:
a) 100% austenit, b) austenit i delta ferit [5]**

Vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja austenitnih čelika slične su vrijednostima kod niskougličnih čelika. Vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) su u rasponu od 205 do 275 MPa, a vlačne čvrstoće (R_m) između 520 i 760 MPa. Istezljivost je između 40 i 60%. Vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja moguće je povisiti hladnom deformacijom.

Austenitni nehrđajući čelici imaju široko rasprostranjenu primjenu. Prehrambena, kemijska i petrokemijska industrija, građevina te kućanstvo su neki od područja primjene ovih čelika zbog njihove otpornosti na koroziju. Najpoznatiji i najstariji austenitni nehrđajući čelik je 18-8 nehrđajući čelik s 18% kroma i 8% nikla. Ovaj čelik je najrasprostranjeniji u kućanstvima te je od njega napravljeno kuhinjsko posuđe i pribor za jelo. [3][4][5]

2.1. Čelik X5CrNiMo17-12-2

X5CrNiMo17-12-2 jedan je od najčešćih austenitnih nehrđajućih čelika. Zbog udjela molibdena u sastavu izrazito je otporan na rupičastu koroziju, a zbog vrlo malog udjela ugljika nije osjetljiv niti na interkristalnu koroziju. Zbog svoje otpornosti na kloridne komponente, prikladan je za korištenje u morskim podnebljima. Tipične primjene ovog čelika su petrokemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji za ventile, prirubnice, izmjenjivače topline i filtere. Kemijski sastav čelika X5CrNiMo17-12-2 naveden je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav X5CrNiMo17-12-2 [5]

EN oznaka	Maseni udio elementa , %								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	S
X5CrNiMo17-12-2	0,07	16,5-18,5	10-13	2-2,5	2	1	0,11	0,045	0,015

Osnovna mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2 pri 20°C u meko žarenom stanju su [7]:

- Vlačna čvrstoća: 500-700 MPa
- Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$: 200-400 MPa
- Istezljivost: 30-45 %
- Kontrakcija: 60-65%
- Tvrdća: 200 HB

A nakon žarenja i hladnog valjanja ima vlačnu čvrstoću u rasponu od 790 do 830 MPa i tvrdoću po Vickersu između 220 i 400 HV.

Toplinska obrada čelika X5CrNiMo17-12-5 se sastoji od postupka žarenja u kojem je proizvod zagrijan na temperaturu od 1900°C te brzim hlađenjem na zraku do temperature između 400 °C i 800 °C. ovaj postupak se treba oprezno provoditi kako bi se izbjegla precipitacija kromovih karbida koja znatno utječe na korozivsku otpornost. Kao što je slučaj sa svim austenitnim čelicima, ni ovaj se ne može otvrdnuti postupcima toplinske obrade. [8]

3. BORIRANJE

3.1. Postupci boriranja

Boriranje je toplinsko-difuzijski postupak koji se sastoji od zagrijavanja dobro očišćenih materijala na temperaturu od 700 do 1000°C i držanja na toj temperaturi pri čemu je površina metala u kontaktu s medijem obogaćenim borom. Boriranje se provodi s ciljem povećanja tvrdoće površine. Kombinacijom povećanja tvrdoće i smanjenja koeficijenta trenja dobije se bolja otpornost na abraziju i umor površine, a životni vijek materijala se produžuje 2 do čak 10 puta. [9]

Medij za boriranje može biti:

- Prašak
- Pasta
- Tekuće sredstvo
- Plin

Boriranje u prašku je najčešća metoda boriranja u industriji zbog svoje jednostavnosti i sigurnosti, zahtjeva minimalnu opremu tako da je ovaj postupak i cjenovno prihvatljiviji. Pasta kao medij se koristi kada je boriranje u prašku skuplje, složenije ili je potrebno lokalno boriranje jednog dijela površine. Provodi se u konvencionalnim pećima u zaštitnoj atmosferi. Boriranje u tekućem sredstvu sa ili bez elektrolize u solnim kupkama, no zbog niza nedostataka rijetko se koristi. Plin kao medij se također rijetko koristi zbog svoje toksičnosti, zapaljivosti i visoke cijene.

Boriranjem na površini nastaje boridni sloj čija debljina, mikrostruktura i svojstva ovise nizu utjecajnih faktora [9]:

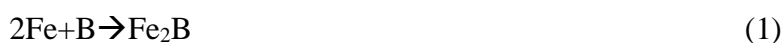
- Temperaturi boriranja
- Trajanju boriranja
- Vrsti materijala
- Mediju za boriranje
- Udjelu legirnih elemenata
- Naknadnoj obradi

3.2. Boridni sloj

3.2.1. *Mehanizam rasta boridnog sloja*

Postupak boriranja sastoji se od dvije reakcije: nukleacije borida i rasta boridnog sloja. Prva reakcija odvija se između tvari bogate borom i površine materijala. Stopa nukleacije čestica na površini ovisi o trajanju i temperaturi boriranja. Druga reakcija je kontrolirana difuzijom te određuje konačnu debljinu boridnog sloja. [9]

Početna kemijska reakcija se odvija između površinskog željeza i atoma u površinskom sloju kristalne rešetke željeza te nastaje Fe₂B sloj.



Ovaj sloj odvaja površinu od okoline bogate borom. Daljnji rast Fe₂B sloja događa se difuzijom atoma željeza iz jezgre i atoma bora iz borom bogate okoline te nastaju dva podsloja:



S duljim vremenom boriranja može doći do pojave FeB sloja. Do toga dolazi kada je brzina potrošnje bora jednaka brzini rasta sloja. FeB nastaje na površini materijala gdje su koncentracije preko 50% atomskog udjela. Fe₂B nastaje kada je atomski udio bora između 33 i 50%. Ispod 33% željezni boridi neće biti prisutni.

Kada brzina difuzije reaktanata bude veća od brzine kemijskih reakcija, rast slojeva FeB i Fe₂B ovisi o 4 parcijalne kemijske reakcije.

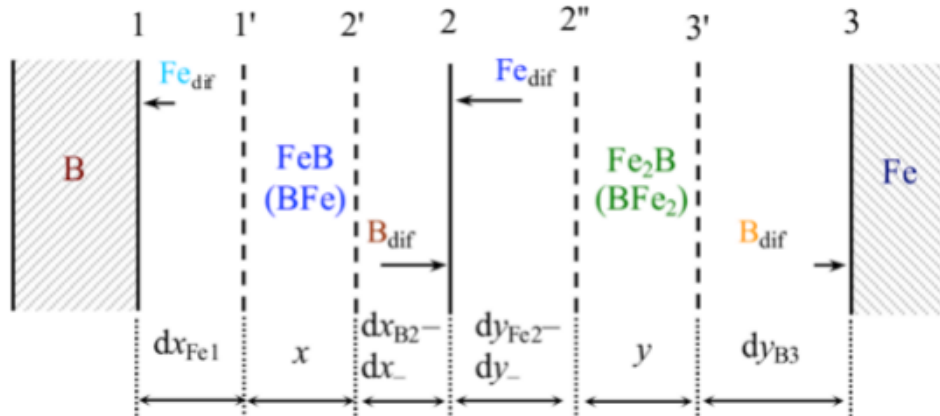
Sloj FeB:



Sloj Fe₂B:



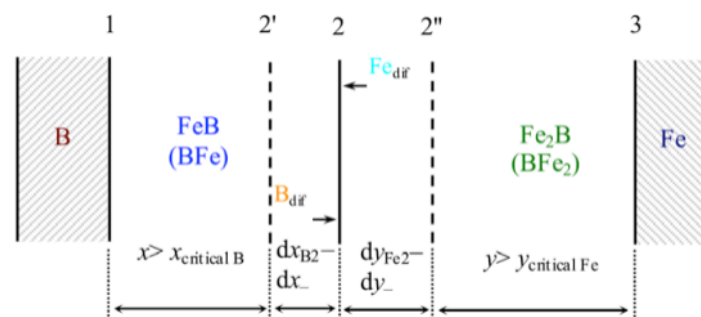
Slika 2. prikazuje rast boridnih slojeva određen brzinom kemijskih reakcija. [10]



Slika 2. Rast boridnih slojeva uvjetovan brzinom kemijskih reakcija [10]

Strelice prikazuju smjer difuzije atoma, a duljine smanjenje broja difundiranih atoma s povećanjem udaljenosti od jezgre. Atomi bora koji nisu ušli u reakciju s Fe_2B na sloju 2 mogu dalje difundirati do sloja 3 i reagirati s površinskim atomima željeza. Sukladno tome, samo oni atomi željeza koji nisu reagirali s FeB na sloju 2 mogu difundirati do sloja 1 i reagirati s površinskim atomima bora.[10]

Povećanje debljine FeB i Fe_2B slojeva rezultira promjenama režima rasta iz kontroliranog reakcijom u kontroliranog difuzijom. Do te promjene dolazi kada brzina kemijskih reakcija bude veća od brzine difundiranih atoma, odnosno dosegne kritičnu debljinu slojeva. Kada FeB dosegne svoju kritičnu debljinu, Fe_2B sloj gubi izvor atoma bora te prestaje rasti. Slika 3. prikazuje rast boridnih slojeva u uvjetima kontrole procesa difuzijom bora.[10]



Slika 3. Rast boridnog sloja uvjetovan difuzijom[10]

3.2.2. Kinetika rasta boridnih slojeva

Trajanje i temperatura provođenja postupka boriranja utječu na debljinu boridnog sloja. Kinetika rasta boridnih slojeva opisana je Fickovim zakonima difuzije. Konačna debljina sloja opisuje se koristeći paraboličnu funkciju [10][11]:

$$d^2 = Kt \quad (8)$$

gdje je:

- d - debljina sloja, mm
- K - konstanta brzine rasta boridnog sloja, mm²/s
- t - vrijeme, s

Konstanta brzine rasta sloja K ovisi o temperaturi boriranja što se iskazuje preko Arrheniusove jednadžbe [10][11]:

$$K = A \times e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (9)$$

gdje je:

- T - temperatura, K
- A - konstanta kemijskog procesa neovisna o temperaturi, m²/s
- Q - energija aktivacije, kJ/kmol
- R - plinska konstanta, kJ/(kmol K)

Množenjem jednadžbe (9) s prirodnim logaritmom dobije se [10][11]:

$$\ln K = \ln A - \frac{Q}{R} \times \frac{1}{T} \quad (10)$$

Jednadžba (10) pokazuje linearnu ovisnost između prirodnog logaritma konstante brzine rasta boridnog sloja i recipročne temperature boriranja. Pomoću ovog izraza moguće je odrediti konstantu brzine rasta i aktivacijsku energiju.

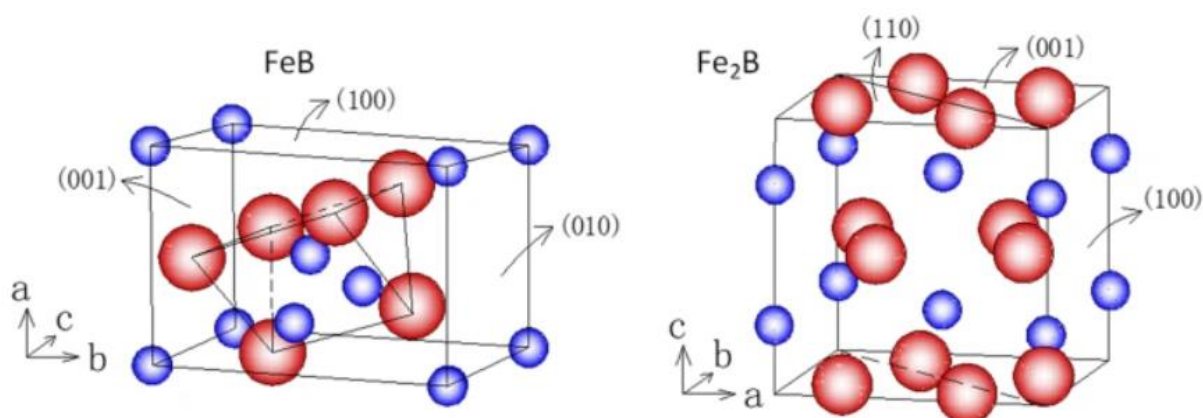
3.2.3. *Željezni boridi*

U boridnom sloju mogu nastati dvije faze, FeB i Fe₂B. Svojstva boridnih slojeva značajno ovise udjelima ovih faza i njihovoj prisutnosti. Tablica 3. prikazuje osnovne razlike u svojstava i strukture ovih faza.

Tablica 3. Svojstva željeznih borida [12]

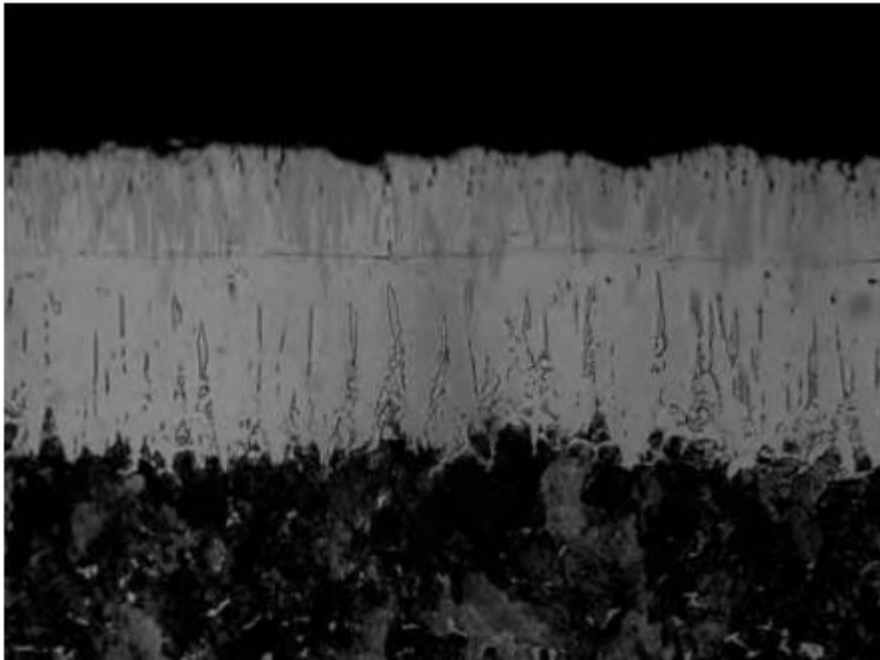
	FeB	Fe ₂ B
% bora	16,23	8,83
Kristalna rešetka	Rompska	Tetragonalna
Naprezanje nakon hlađenja	Vlačna	Tlačna
Toplinska rastezljivost [$10^{-6}/K$]	23	7,9-9,2
Tvrdoća [HV0.1]	1900-2100	1650-2000
Gustoća [g/cm^3]	6,75	7,43
Modul elastičnosti [GPa]	343	284
Toplinska vodljivost [W/mK]	12	30

Slika 4. prikazuje kristalne rešetke željeznih borida. Crvenom su prikazani atomi željeza, a plavom atomi bora.



Slika 4. Kristalne rešetke željeznih borida [13]

Najpoželjnija mikrostruktura nakon boriranja je monofazni boridni sloj Fe₂B. U nekim slučajevima formira se dvosloj, vanjski tamniji sloj FeB i unutarnji svjetliji Fe₂B. Dvoslojna struktura nije poželjna jer je FeB faza krhkija od Fe₂B faze. Nakon hlađenja dolazi do zaostalih vlačnih i tlačnih naprezanja zbog različitih koeficijenata toplinske rastezljivosti FeB i Fe₂B faza, to često dovodi do formiranja pukotina u susjednoj zoni koje se pod utjecajem opterećenja šire, a može doći i do razdvajanja slojeva. Slika 5. prikazuje razdvajanje slojeva kod C45 čelika boriranih 6 sati na 927°C. [9]



Slika 5. Razdvajanje boridnog sloja [9]

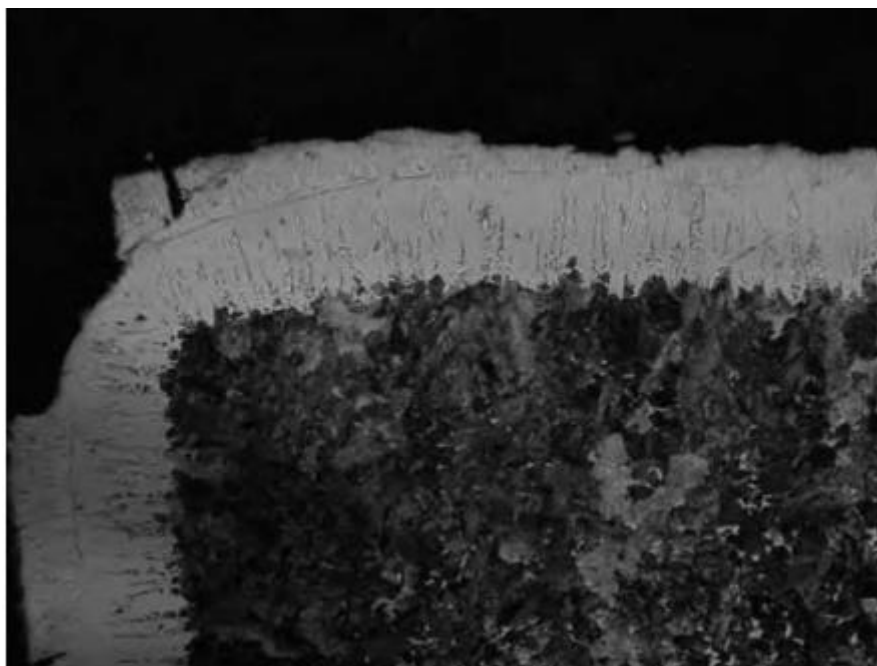
3.2.3.1. Metode sprječavanja nastanka FeB faze

Nastanak FeB faze može se spriječiti [9]:

- Smanjenjem vremena i temperature boriranja.
- Upotrebom čelika s manjim udjelom legirnih elemenata. Legirni elementi usporavaju difuziju bora što dovodi do sakupljanja bora na površini i stvaranja FeB faze.
- Korištenjem boridnog sredstva s manjim udjelom bora. Time se smanjuje da koncentracija bora dosegne 50% potrebnih za stvaranje FeB.
- Izbjegavanjem oštih kuteva prilikom oblikovanja. Takvi dijelovi izloženi su velikim koncentracijama bora zbog difuzije iz više kuteva. Ovakvi slučajevi prikazani su na slikama 6. i 7. [9]



Slika 6. Nastanak FeB faze na vrhu oštrice alata [9]



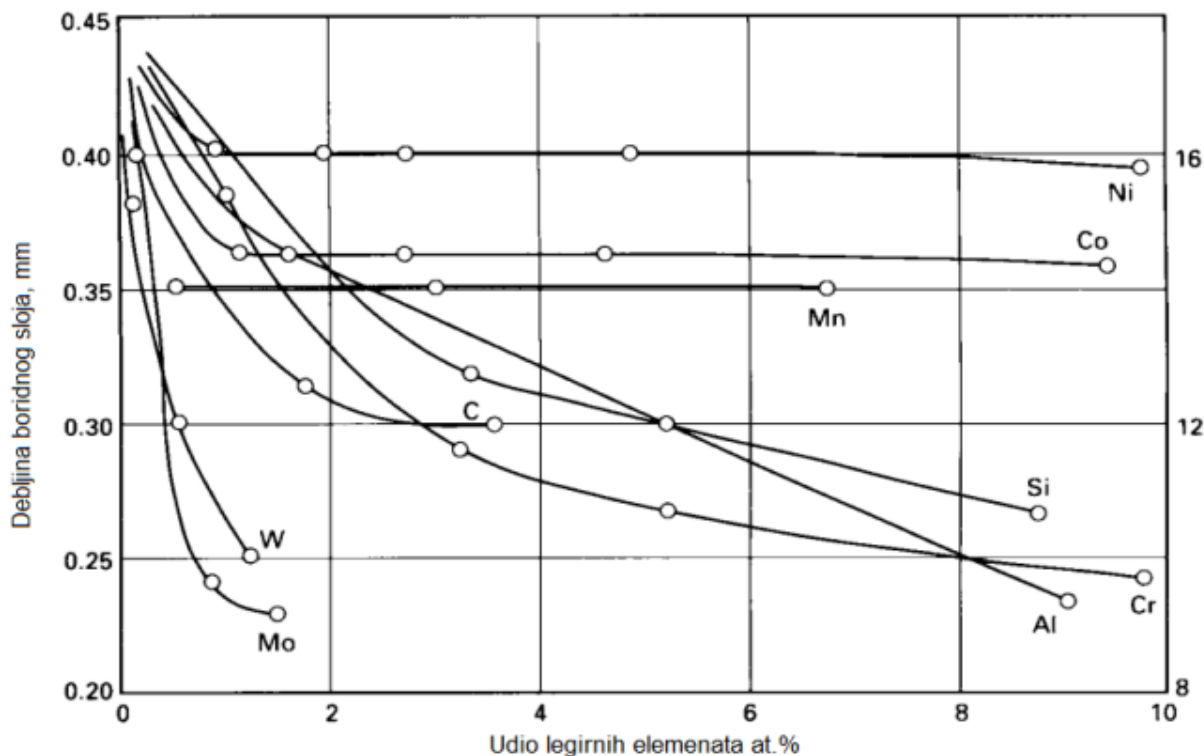
Slika 7. Otkrhnuće boridnog sloja na oštrom rubu uzorka [9]

3.2.4. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva borida

Mehanička svojstva boriranih legura značajno ovise o kompoziciji i strukturi boridnih slojeva. Nazubljena struktura boridnog sloja karakteristična je kod čistog željeza, niskougličnih nelegiranih čelika te niskolegiranih čelika. Povećanjem udjela legirnih elemenata ili ugljika,

potiskuje se razvoj „zubi“ i pojavljuje se nagli prijelaz između boridnog sloja i osnovnog materijala.

Legirni elementi smanjuju debljinu boridnog sloja zbog ograničene difuzije bora u čelik. Slika 8. prikazuje utjecaj legirnih elemenata na debljinu boridnog sloja [9].



Slika 8. Utjecaj legirnih elemenata na debljinu boridnog sloja [9]

3.2.5. Boriranje u prašku

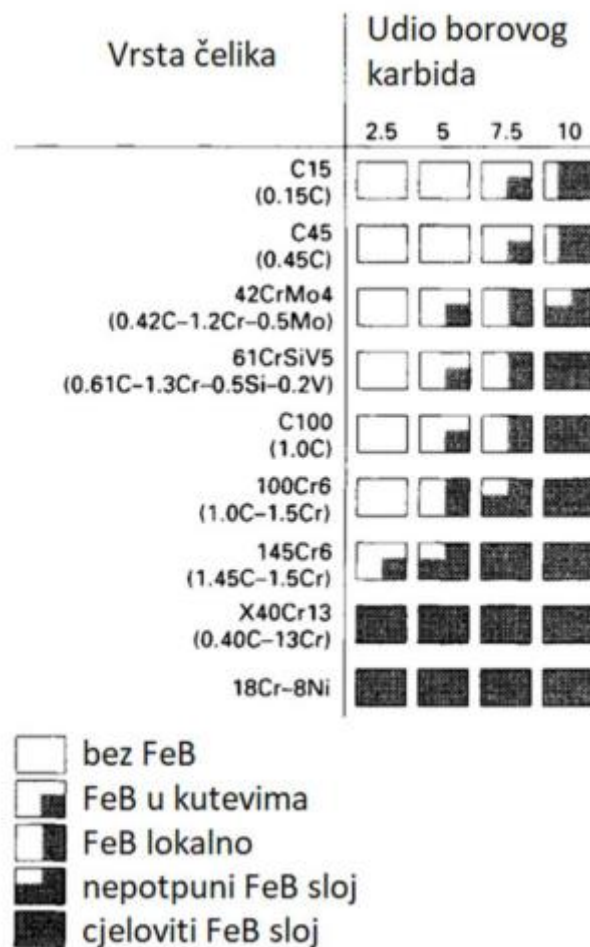
Boriranje u prašku postupak je koji je najčešće u uporabi zbog jednostavnosti opreme i rukovanja te je siguran i ekonomičan. Materijal se položi u toplinski otpornu čeličnu posudu tako da prašak bude u kontaktu s površinama koje se želi borirati. Postupak se provodi u pećima te se nakon određenog vremena vadi iz peći i hladi na zraku.

Sredstva za boriranje sastoje se od tvari bogatih boro, aktivatora i punila. Tvari bogate borom su željezni bor (FeB), borov karbid (B_4C) i amorfni bor. Amorfni bor i FeB imaju veći potencijal bora te stvaraju deblji sloj, ali su skuplji. Aluminijev oksid (Al_2O_3) i silicijev karbid (SiC) su punila te ne sudjeluju u reakciji, no silicijev karbid kontrolira količinu bora te sprječava naljepljivanje boridnog sredstva na površinu materijala. NH_4Cl , BaF_2 , $NaBF_4$ i mnogi drugi služe kao aktivatori [9].

Tipični sastavi komercijalno dostupnih sredstava za boriranje u prašku [9]:

- 5% B₄C, 90% SiC, 5% KBF₄
- 50% B₄C, 45% SiC, 5% KBF₄
- 85% B₄C, 15% Na₂CO₃
- 95% B₄C, 5% Na₂B₄O₇
- 84% B₄C, 16% Na₂B₄O₇
- Amorfni bor (sadrži 95 do 97% B)

Kemijski sastav boridnog sredstva značajno utječe na sastav boridnog sloja. Slika 9. prikazuje različite sastave boridnog sredstva i utjecaj na stvaranje faze FeB kod različitih vrsta čelika.



Slika 9. Utjecaj boridnog sredstva na sastav faza boridnog sloja [9]

Slika 11. pokazuje važnost korištenja boridnog sredstva odgovarajućeg sastava. Na primjeru čelika 42CrMo4 vidljivo je kako pri niskom udjelu borova karbida nema stvaranja FeB faze, no povećanjem udjela borova karbida dolazi do stvaranja i postepenog povećavanja udjela FeB faze.

3.2.6. Svojstva boridnih slojeva

3.2.6.1. Tvrdća i otpornost na trošenje

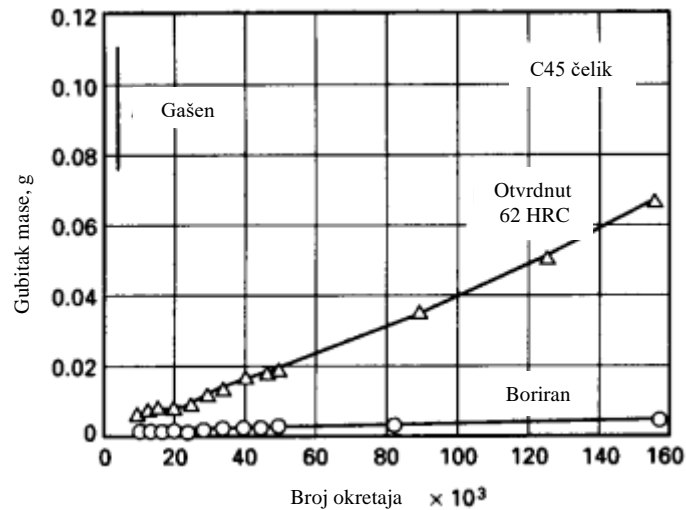
Boriranjem se postižu poboljšana svojstva materijala. najveća prednost boriranja nad drugim postupcima modificiranja površine jest tvrdća. Tablica 4. prikazuje tvrdće čelika postignute boriranjem i one postignute drugim toplinskim postupcima.

Tablica 4. Tvrdće toplinski obrađenih čelika

Materijal	Tvrdća (HV)
Borirani meki čelik	1600
Borirani X40CrMoV5-1 čelik	1800
Borirani X100CrMoV5 čelik	1900
Poboljšani X40CrMoV5-1 čelik	540-600
Poboljšani X100CrMoV5 čelik	630-700
Brzorezni čelik HS2-9-1-8	900-910
Nitrirani čelik	650-1700
Karburirani niskolegirani čelik	650-950

Zbog svoje visoke tvrdće, borirani čelici su izrazito otporni n adheziju i abraziju. [14]

Slika 10. prikazuje utjecaj boriranja na trošenje u ovisnosti na broj okretaja.

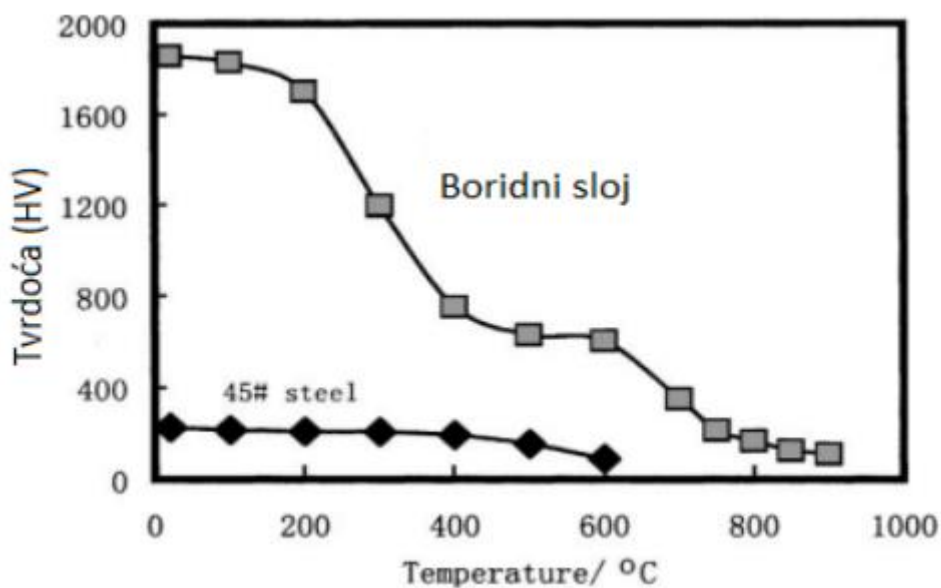


Slika 10. Utjecaj boriranja na trošenje [9]

3.2.6.2. Otpornost borida na visokim temperaturama

Tvrdoća boridnih slojeva održiva je na višim temperaturama nego kod konvencionalnih načina toplinske obrade. Borirane čelike moguće je koristiti na temperaturama do 650°C, dok bi nitrirani, karburirani, nitrokarburirani i karbonitrirani čelici omekšali nakon kratkog vremena. [9]

Promjena tvrdoće boridnog sloja s povećanjem temperature kod ugljicnog čelika C45 prikazana je na slici 11.



Slika 11. Utjecaj temperature na tvrdoću [15]

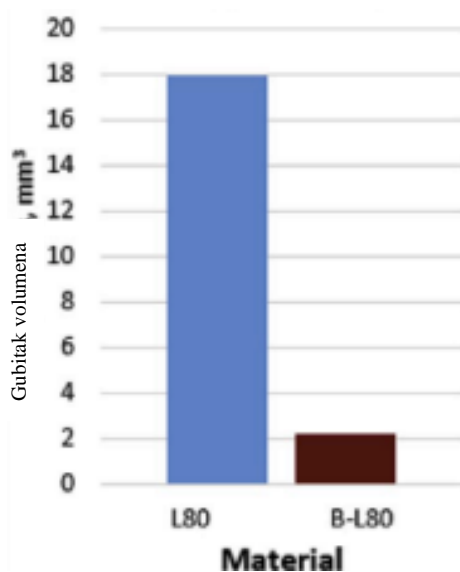
3.2.6.3. Otpornost boridnog sloja na eroziju

Erozija je česta pojava u proizvodnji nafte, naftnog pijeska, u rudarenju i obradi minerala te uzrokuje velike gubitke u industriji. Modificiranje površina je efektivan način zaštite čeličnih komponenti i sprječavanja erozije pri temperaturama do 500°C. [16]

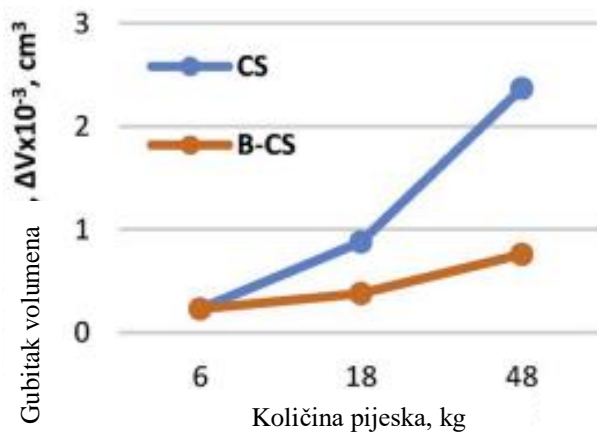
Modificirane površine moraju biti [16]:

- Visoke tvrdoće
- Kemijski inertne
- Guste strukture
- Dovoljne debljine

U ovakvim radnim uvjetima, boriranje ima značajan potencijal za zaštitu komponenti te donosi značajan porast otpornosti na eroziju. Slike 12. i 13. prikazuju ispitivanje na eroziju čelika C22 i 21Mn5. [16]



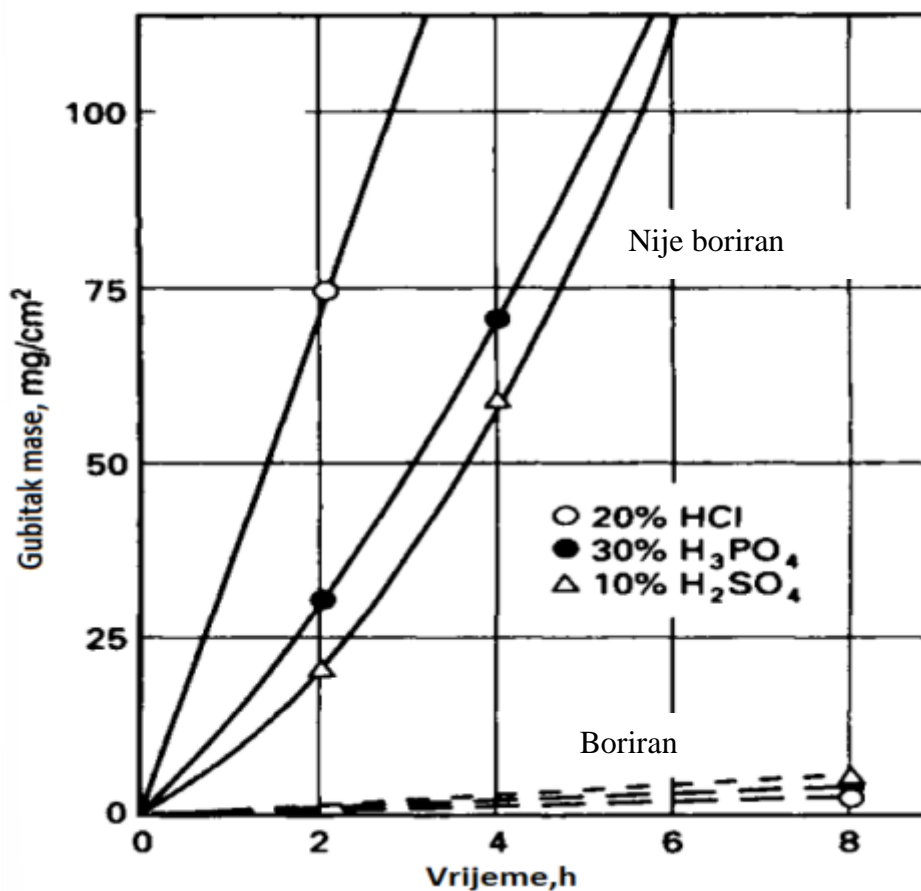
Slika 12. Erozijsko ispitivanje neobrađenog i boriranog 21Mn5 (L80) čelika [16]



Slika 13. Erozijsko ispitivanje neobrađenog i boriranog C22 čelika [16]

3.2.6.4. Kemijska otpornost boridnog sloja

Boriranje znatno povećava otpornost materijala na klorovodičnu, fluorovodičnu, sumpornu i fosfornu kiselinu. Slika 14. pokazuje utjecaj mineralnih kiselina na borirani i neborirani C45 čelik. [9]



Slika 14. Utjecaj kiselina na čelik C45 [9]

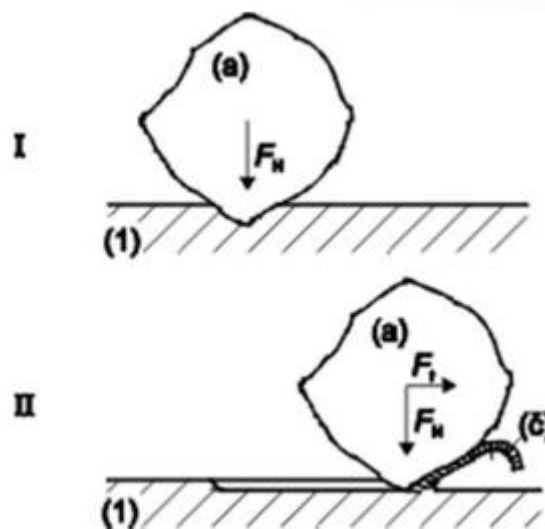
3.2.7. Primjena boridnih slojeva

Borirani dijelovi su prisutni u raznim područjima industrije. Neki primjeri boriranih komponenta jesu slijedeće [9]:

- Rotirajući čelični prstenovi i čelična užad
- Razni ventili
- Mlaznice plamenika
- Vodilice
- Dijelovi poljoprivrednih strojeva
- Dijelovi strojeva za ekstruziju
- Cijevi

4. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA MIKROABRAZIJU SLOBODNO ROTIRAJUĆOM KUGLICOM

Mikroabrazija je trošenje materijala uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama, a dovodi do istiskivanja materijala. najčešći je mehanizam trošenja. Svaki mehanizam trošenja opisan je jediničnim događajem. Jedinični događaj mikroabrazije sastoji se od dvije faze koje su prikazane na slici 15.

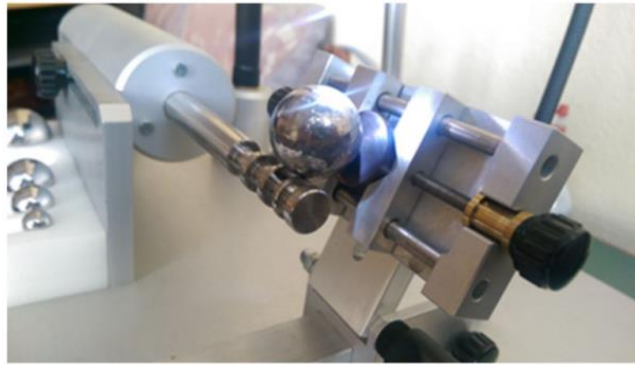


Slika 15. Jedinični događaj mikroabrazije [17]

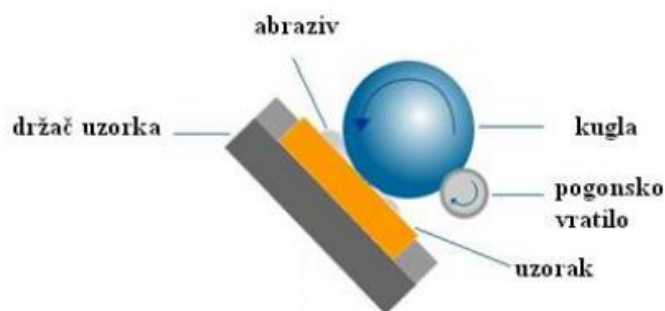
- I faza – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N
- II faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_T [17]

Tradicionalne metode ispitivanja abrazije, kao što su metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ i „pin on disc“ metoda, nisu prikladne za primjenu na tankim slojevima. Iz tog razloga se primjenjuje metoda slobodno rotirajuće kuglice, odnosno kalotest. [19]

Za ispitivanje otpornosti na mikroabraziju koristi se kalotest uređaj sa slobodno rotirajućom kuglicom prikazan na slici 16. Na slici 17. je shematski prikaz metode ispitivanja. [20]



Slika 16. Kalotester sa slobodno rotirajućom kuglicom [20]



Slika 17. Shematski prikaz ispitivanja kalotestom [18]

U radu je korištena kuglica promjera 20 mm, izrađena od čelika 100Cr6 i mase $m=32,6 \pm 0,05$ g koja je rotirala brzinom 300 okretaja u minuti. Na nju se nanosi abraziv. Uzorak je položen na podlogu pod kutem $\rho=55^\circ$. kut omogućuje kontinuiranu i jednoliku rotaciju kuglice bez klizanja. Nakon ispitivanja na površini je vidljiv sferični krater. Uzorci se prije i poslije ispitivanja čiste u 95 postotnom alkoholu 3 minute te se suše u peći na 75°C 10 minuta. Sferični otisak se analizira pod optičkim stereomikroskopom te se mjere dimenzije kratera, vertikalni i horizontalni promjer. [20]

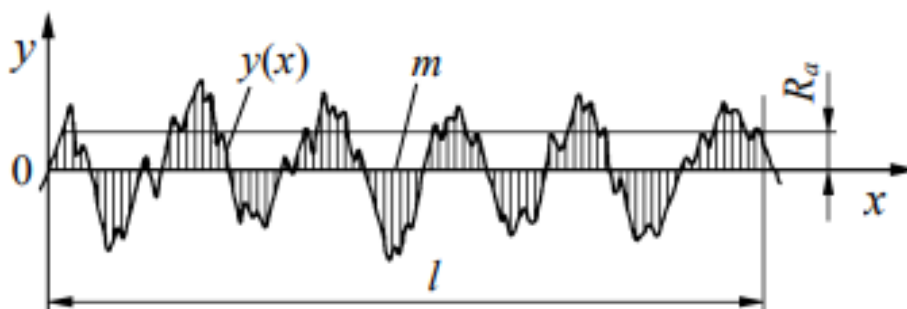
Značajno utjecajni parametri ispitivanja kalotestom jesu slijedeći:

- Abrazivni materijal
- Veličina i oblik abrazivnih čestica
- Brzina nanošenja abraziva
- Brzina rotacije
- Hrapavost površine [20]

5. ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE

Hrapavost površine je mikogeometrijska nepravilnost površine nastala tijekom postupaka obrade ili pod drugim utjecajima. Hrapavost površine može značajno utjecati na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na spojevima gdje utječe na trenje i zračnost. [21]

Iznos hrapavosti mjeri se s obzirom na srednju referentnu crtu profila neravnine m , koja dijeli profil tako da je unutar mjerne duljine l veličina svih kvadrata odstupanja profila od te crte najmanja. Za procjenjivanje hrapavosti površine najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila R_a . R_a jednak je srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l . Slika 18. prikazuje procjenu hrapavosti površine koristeći R_a , a jednažba (11) se koristi za njegov izračun. [21]



Slika 18. Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednje aritmetičko odstupanje R_a [21]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (11)$$

Gdje je:

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila, μm
- l – mjerna duljina hrapavosti površine, μm
- $y(x)$, y_i – visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu, μm
- x – dužina uzduž mjerne duljine, μm
- n – broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine

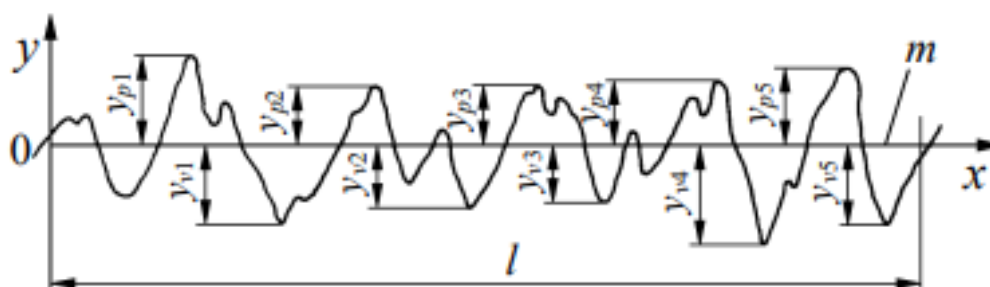
Srednja visina neravnina R_z također se često koristi kao parametar hrapavosti. R_z je jednak zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i pet najvećih

dubina udolina na mjernoj duljini l . Jednadžba (12) koristi se za izračun R_z , a na slici 19. prikazana je procjena hrapavosti pomoću srednje visine neravnina R_z . [21]

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|) \approx 4 \times R_a \quad (12)$$

Gdje je:

- R_z – srednja visina neravnina, μm
- y_{pi} – visina i -tog najvišeg vrha, μm
- y_{vi} – visina i -te najniže udoline, μm



Slika 19. Procjena hrapavosti koristeći srednju visinu neravnina R_z [21]

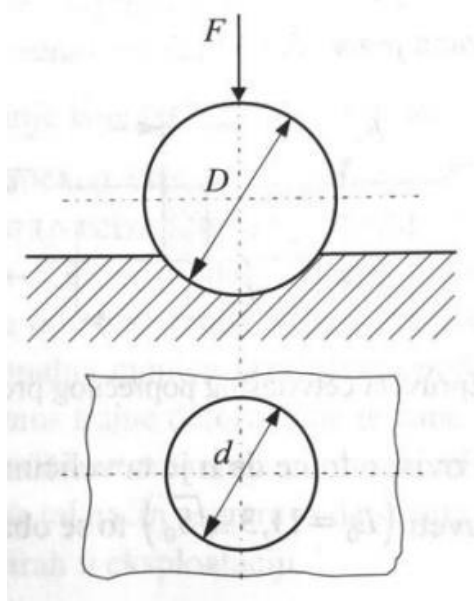
6. ISPITIVANJE MIKROTVRDOĆE

Tvrdoća je definirana kao otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg materijala. U primjeni su tri glavne metode za mjerenje tvrdoće:

- Metoda po Brinellu
- Metoda po Vickersu
- Metoda po Rockwellu [22]

6.1. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom

Brinellova metoda koristi se isključivo za mjerenje tvrdoće metalnih materijala. Kod ove metode kuglica od kaljenog čelika utiskuje se u metal. Kuglica se utiskuje određenom silom, a materijal ostavlja otisak oblika kalote. Slika 20. prikazuje skicu kuglice i otiska kod Brinellove metode. [22]



Slika 20. Brinellova metoda [22]

Mjernim povećalom mjeri se promjer baze kugline kalote d i tvrdoća se određuje pomoću izraza [22]:

$$HB = \frac{0,204F}{\pi D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (13)$$

Gdje su:

- F – sila, N

- D – promjer kuglice, mm
- d – promjer baze kuglinog otiska, mm

Prednosti metode po Brinellu [22]:

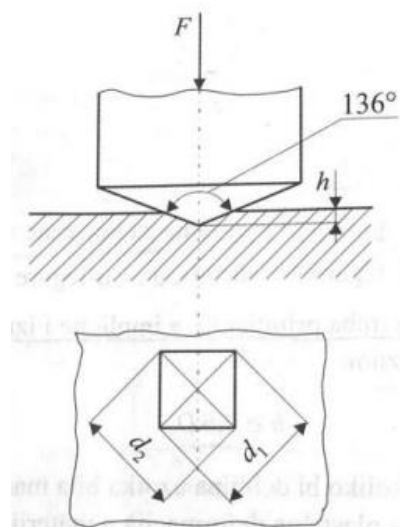
- lako mjerenje veličine otiska (moguće je mjernim povećalom)
- selektivna metoda – mjerno područje je od 0 do 450 jedinica
- jednostavna priprema površine

Nedostaci metode su [22]:

- ispitivanje materijala visoke tvrdoće nije moguće
- tvrdoća ovisi o opterećenju
- relativno velik otisak koji funkcionalno i estetski nagrđuje površinu

6.2. Ispitivanje tvrdoće Vickers metodom

Kod ove metode uklonjeni su glavni nedostaci Brinellove metode promjenom geometrije i materijala penetratora. Kod Vickers metode penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od 136° izrađena od dijamanta. U materijalu nakon utiskivanja ostaje oblik piramide što je prikazano na slici 21. koja također prikazuje i oblik penetratora. [22]



Slika 21. Vickersova metoda [22]

Mjernim mikroskopom mjere se dijagonale (d_1 , d_2) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje pomoću izraza [22]:

$$HV = \frac{0,189F}{d^2} \quad (14)$$

Gdje su:

- F – primijenjena sila, N
- d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide, mm ($d=(d_1+d_2)/2$)

Ova metoda također ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti Vickersove metode su [22]:

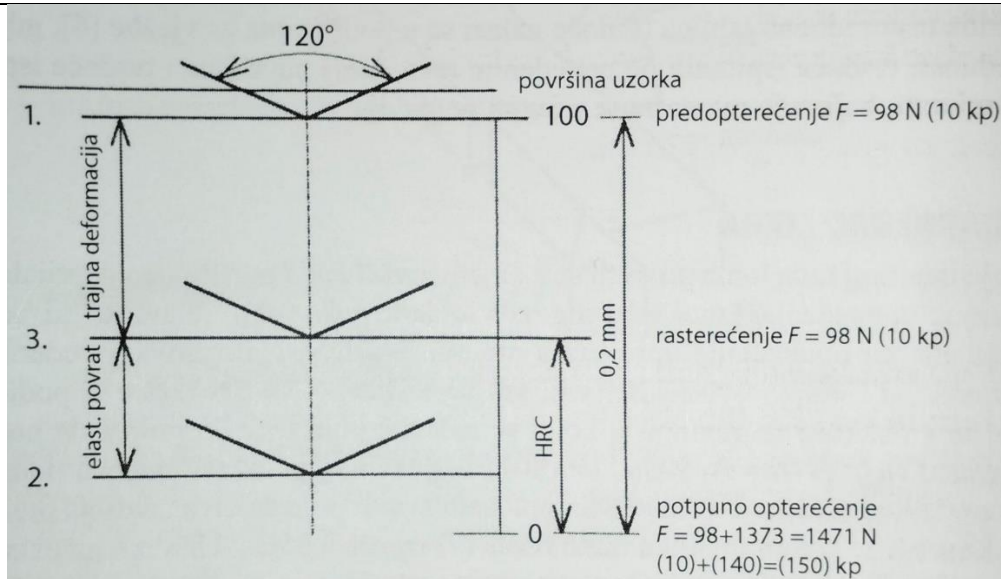
- tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili
- moguće mjerenje tvrdoće i najtvrdih materijala
- moguće mjerenje tvrdoće vrlo tankih uzoraka, te tvrdoće pojedinih kristalnih zrna
- jedina je od tri spomenute metode primjenjiva u znanstveno istraživačkom radu na području materijala
- otisak je malen i ne oštećuje površinu

Nedostaci metode su [22]:

- potrebna je brižljiva priprema površine uzorka (fino brušenje i poliranje)
- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop

6.3. Mjerenje tvrdoće metodom po Rockwellu C

Ovom metodom se kao i Brinellovom mjeri tvrdoća samo metalnih materijala. Rockwell metoda ima dvije vrste penetratora. Dijamantni stožac za HRC metodu i kuglicu od kaljenog čelika za HRB metodu. Dijamantni stožac ima vršni kut od 120° . Kod ove metode mjeri se dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska. Slika 22. prikazuje način mjerenja tvrdoće po HRC metodi. [22]



Slika 22. Rockwell metoda [22]

U položaju 1 penetrator je predopterećen silom $F=98 \text{ N}$ te je to početni položaj mjerenja dubine prodiranja. Penetrator ukupno prodire $0,2 \text{ mm}$ te je ta duljina podijeljena na 100 jednakih dijelova. Jedan dio iznosi $0,002 \text{ mm}$ predstavlja jedan stupanj tvrdoće po HRC metodi. Skala je okrenuta naopako što znači da je u početnom položaju vrijednost 100, a na najvećoj mogućoj dubini 0 jer tvrdi materijal znači manju dubinu prodiranja. [22]

Prednosti HRC metode [22]:

- Mjerenje je brzo te se tvrdoća očitava na skali tvrdomjera
- Nije potrebna priprema površine

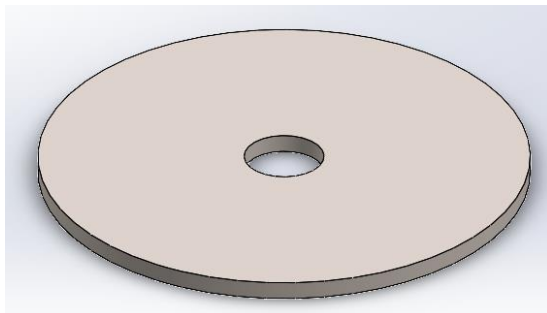
Nedostaci ove metode su [22]:

- Slaba je selektivnost jer je mjerno područje samo 0-100
- Nepreciznost $\pm 2 \text{ HRC}$

7. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA

7.1. Ispitni uzorci i plan pokusa

U eksperimentalnom dijelu rada na uzorcima od čelika X5CrNiMo17-12-2 provedeno je boriranje u prašku s ciljem određivanja debljine, mikrostrukture, mikrotvrdoće te otpornosti na mikroabraziju boridnog sloja. Uzorci su podložne pločice dimenzija $\varnothing 40/6,5 \times 1,5$ mm. Na slici 23. prikazan je 3D model pločice.



Slika 23. 3D model ispitnog uzorka

Boriranje i ispitivanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Boriranje je provedeno u komornoj elektrootpornoj peći „Pika“ s automatskom regulacijom temperature na temperaturi od 950°C. Borirana su po tri uzorka u trajanjima boriranja 2, 3 i 4 sata. Na slici 24. je prikazana peć korištena za boriranje.



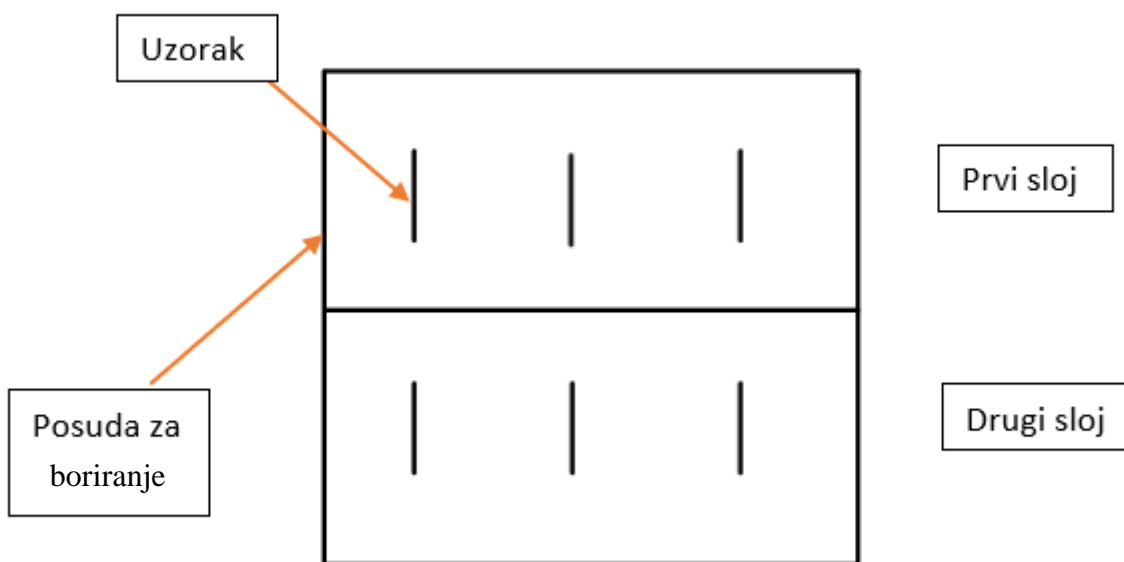
Slika 24. Elektrootporna peć s automatskom regulacijom temperature

Za boriranje je korišten prašak DURBORID G. U posudu od vatrootpornog čelika volumena 1litre su postavljeni uzorci u 2 sloja te su okruženi praškom. Svaki uzorak je bio okružen

praškom u debljini 5mm. Slika 25. prikazuje kutiju s uzorcima u prašku prije boriranja, a slika 26. shematski prikaz položaja uzoraka u kutiji.

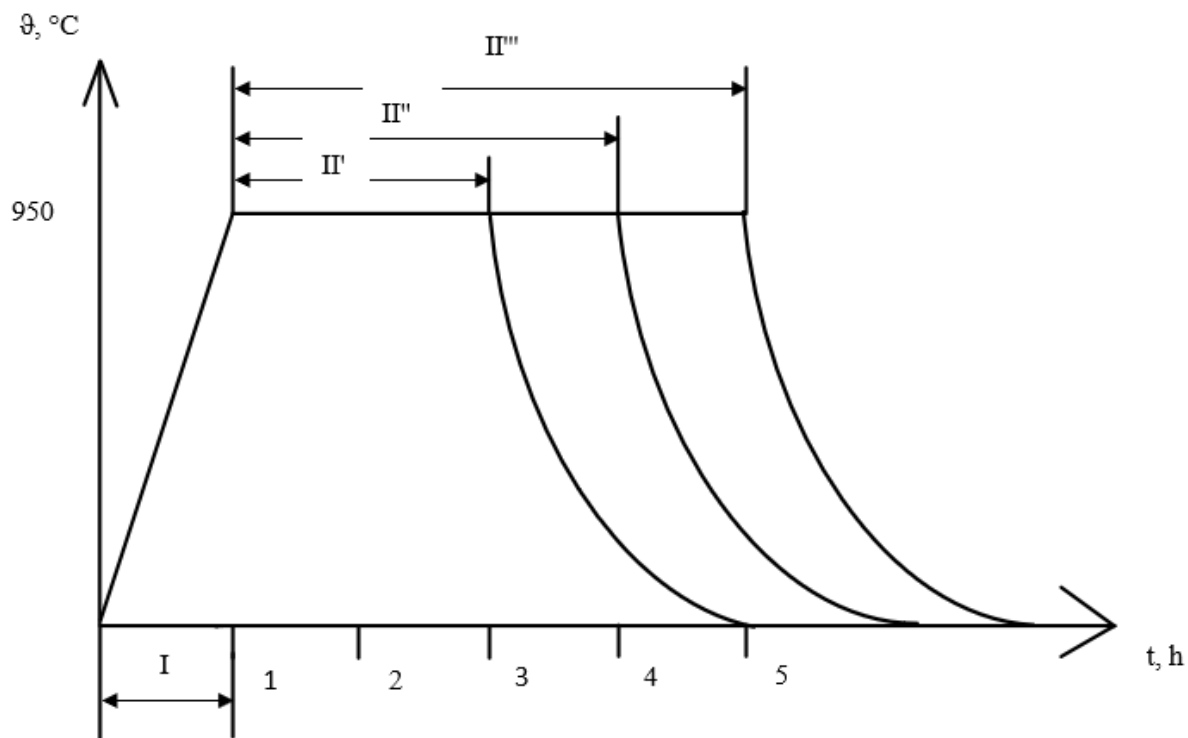


Slika 25. Položaj uzoraka u posudi za boriranje



Slika 26. Shema uzoraka u posudi za boriranje

Slika 27. prikazuje dijagram provođenja postupka boriranja. S oznakom „I“ je označeno progrijavanje uzoraka u trajanju 1 sat, a s oznakom „II“ je označeno boriranje trajanja 2, 3 i 4 sata. Uzorci su nakon boriranja hlađeni u peći.



Slika 27. Dijagram postupka boriranja

Uzorci koji su u posudi bili u gornjem sloju su oksidirali te je došlo do otkrnuća boridnog sloja, stoga se na njima ne provodi daljnja analiza.

U tablici 5. su prikazane oznake uzoraka i trajanje boriranja svakog, a na slici 28. su prikazani uzorci nakon boriranja.

Tablica 5. Oznake polaznih i boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2

Oznaka	Proces boriranja
B10	Polazno stanje
B21	1 sat predgrijavanje + 2 sata boriranje + hlađenje u peći
B31	1 sat predgrijavanje + 3 sata boriranje + hlađenje u peći
B41	1 sat predgrijavanje + 4 sata boriranje + hlađenje u peći



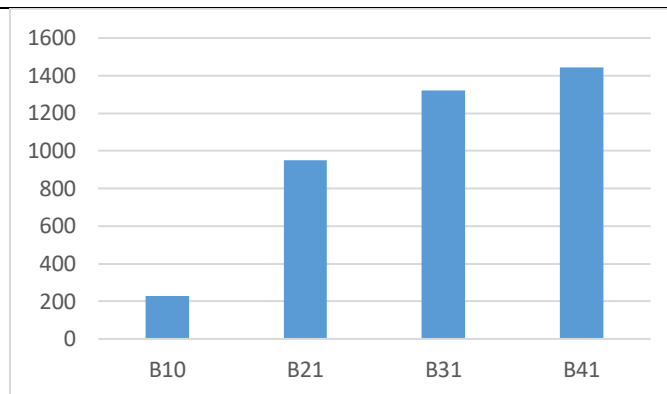
Slika 28. Uzorci od čelika X5CrNiMo17-12-2 nakon boriranja u prašku DURBORID G

7.2. Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanje tvrdoće se provelo Vickers metodom HV0,5 pod opterećenjem 5N. U tablici 6. su prikazani rezultati ispitivanja mikrotvrdoće.

Tablica 6. Mikrotvrdoće HV0,5 boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2

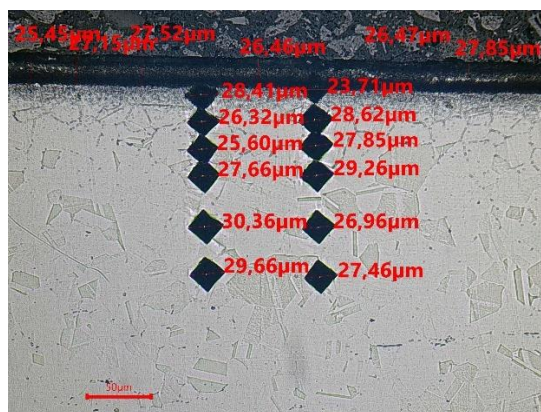
	B10	B21	B31	B41
1	219	905	1166	1351
2	213	965	1372	1310
3	223	929	1472	1425
4	258	1133	1293	1675
5	230	812	1310	1450
Prosjek	228,6	948,8	1322,6	1442,2



Slika 29. Tvrdoća površine boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2

Slika 29. prikazuje histogram srednjih vrijednosti tvrdoće na površini za svaki uzorak. Iz rezultata mjerenja vidi se kako se boriranjem značajno povećala tvrdoća. Tvrdoća nakon boriranja je do 6 puta veća nego na neobrađenom uzorku.

Na uzorcima B21 i B31 izmjerena je i mikrotvrdoća po dubini boridnog sloja Vickers metodom s opterećenjem od 1 N, odnosno metodom HV0,1. Na slici 30. vidljivi su otisci u obliku pravilne četverostrane piramide nastali tokom mjerenja.



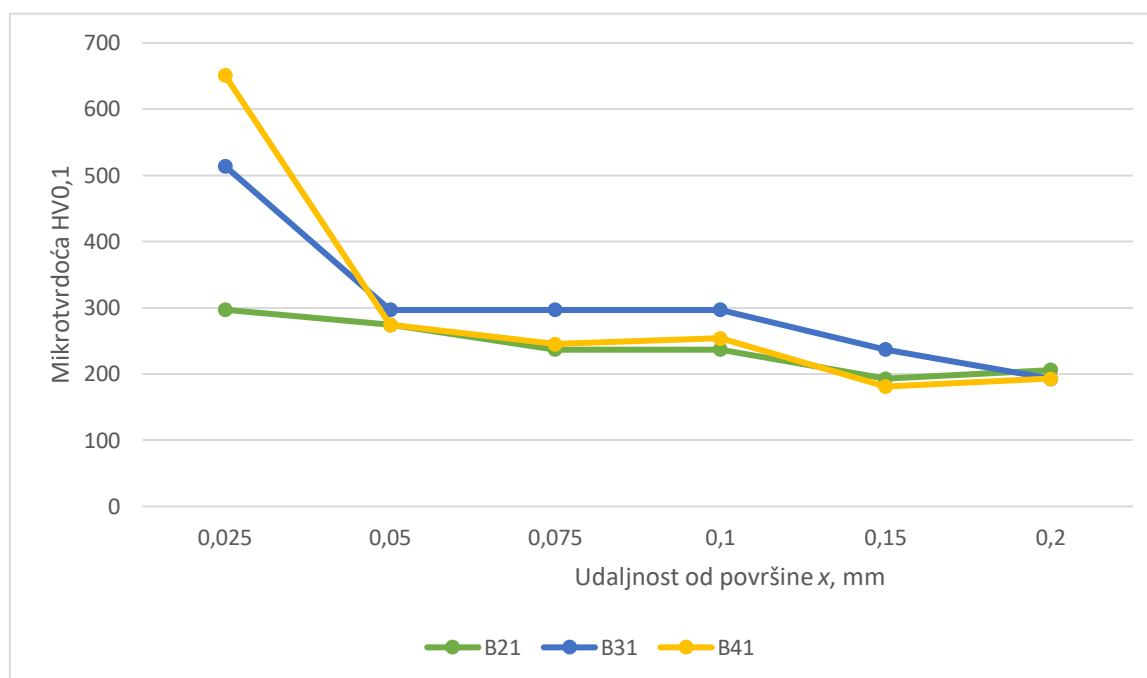
Slika 30. Otisci nastali mjerenjem mikrotvrdoće po dubini na boriranom uzorku B21

Na slici su vidljive dimenzije jedne dijagonale koje su korištene za izračun mikrotvrdoće korištenjem jednadžbe (14). Tablica 7. sadrži iznose mikrotvrdoće za uzorke B21, B31 i B41 po udaljenosti od površine x .

Tablica 7. Mikrotvrdoća po dubini površinskog sloja na uzorcima od čelika X5CrNiMo17-12-2

Udaljenost od ruba x , mm	Mikrotvrdoća po presjeku ispitnog uzorka, HV0,1		
	B21	B31	B41
0,025	297	514	651
0,050	274	297	274
0,075	237	297	245
0,100	237	297	254
0,150	193	237	181
0,200	206	193	193

Rezultati mjerenja su dijagramom prikazani na slici 31.



Slika 31. Dijagram mikrotvrdoće po dubini boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2

Prema rezultatima mjerenja mikrotvrdoće po dubini uzorka, možemo zaključiti da je boridni sloj tanji od 0,050 mm. Kod uzorka B21 postoji mogućnost da boridni sloj završava na dubini između 0,025 i 0,05 mm jer je tvrdost nešto povišenija. Analiza debljine boridnog sloja opisana je u poglavlju 7.4.

7.3. Ispitivanje hrapavosti površine

Hrapavost površine ispitana je na uređaju TIME 3202. za analizu podataka korištene su metode opisane u poglavlju 5. Mjerna duljina svakog mjerenja je 0.8 mm te je provedeno pet mjerenja na svakom uzorku. Na slici 32. prikazan je uređaj za mjerenje hrapavosti.



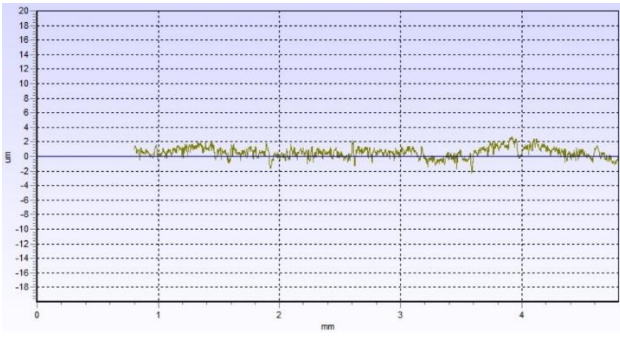
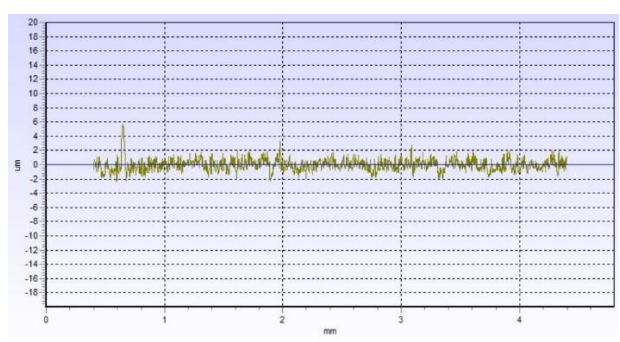
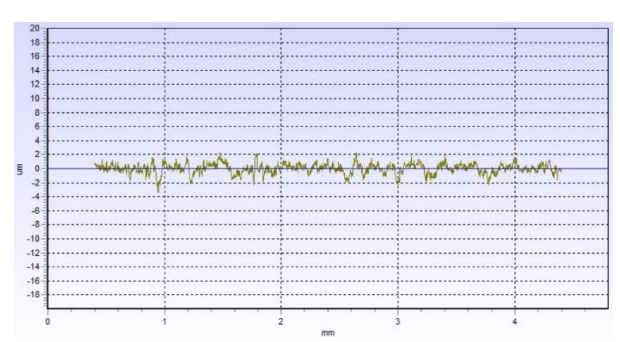
Slika 32. Uređaj za mjerenje hrapavosti TIME 3202

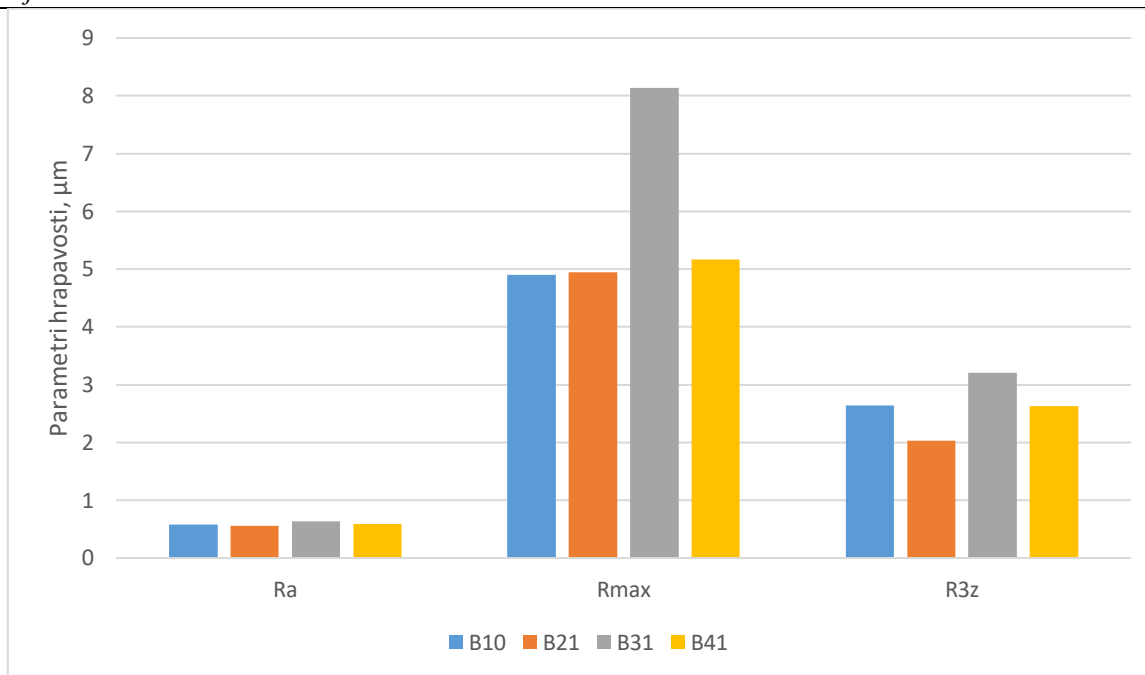
U tablici 8. prikazani su rezultati mjerenja 3 parametra, R_a , R_{max} i R_{3z} , te slike profila hrapavosti površine dobivene ispitivanjem.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na polaznom uzorku i boriranim uzorcima

Oznaka uzorka	Parametri hrapavosti		
	R_a , μm	R_{max} , μm	R_{3z} , μm
B10	0,581	4,902	2,640
B21	0,558	4,941	2,027
B31	0,630	8,134	3,203
B41	0,591	5,166	2,626
	Profil hrapavosti		
B10			

Tablica 9. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine na polaznom uzorku i boriranim uzorcima (nastavak)

B21	 <p>The graph shows a surface roughness profile for sample B21. The vertical axis is labeled 'um' and ranges from -18 to 20 with major ticks every 2 units. The horizontal axis is labeled 'mm' and ranges from 0 to 4 with major ticks every 1 unit. The profile is a jagged line fluctuating around a mean line at 0 um, with most of the signal contained within the ±4 um range.</p>
B31	 <p>The graph shows a surface roughness profile for sample B31. The vertical axis is labeled 'um' and ranges from -18 to 20 with major ticks every 2 units. The horizontal axis is labeled 'mm' and ranges from 0 to 4 with major ticks every 1 unit. The profile is a jagged line fluctuating around a mean line at 0 um, with most of the signal contained within the ±4 um range.</p>
B41	 <p>The graph shows a surface roughness profile for sample B41. The vertical axis is labeled 'um' and ranges from -18 to 20 with major ticks every 2 units. The horizontal axis is labeled 'mm' and ranges from 0 to 4 with major ticks every 1 unit. The profile is a jagged line fluctuating around a mean line at 0 um, with most of the signal contained within the ±4 um range.</p>



Slika 33. Usporedba srednjih rezultata ispitivanja hrapavosti površine ne boriranog i boriranih uzoraka od čelika X5CrNiMo17-12-2

Na slici 33. nalazi se dijagram s rezultatima ispitivanja hrapavosti površine. Iz rezultata je vidljivo da boriranje ne utječe značajno na hrapavost površine jer se boridni slojevi stvaraju ravnomjerno na površini.

7.4. Mikrostrukturalna analiza boriranih uzoraka

Nakon boriranja, uzorci su poprečno prerezani kako bi se mogla odrediti debljina, tvrdoća i mikrostruktura boridnog sloja. Uzorci su zaliveni u polimernu masu radi lakšeg rukovanja i da se zaštite. Provedeno je elektrokemijsko nagrizanje uzorka u 10 %-tnoj vodenoj otopini oksalne kiseline u trajanju 20 s primjenom istosmjerne struje napona 15 V. Slika 34. prikazuje uzorke u polimernoj masi pripremljene za mikrostrukturnu analizu.

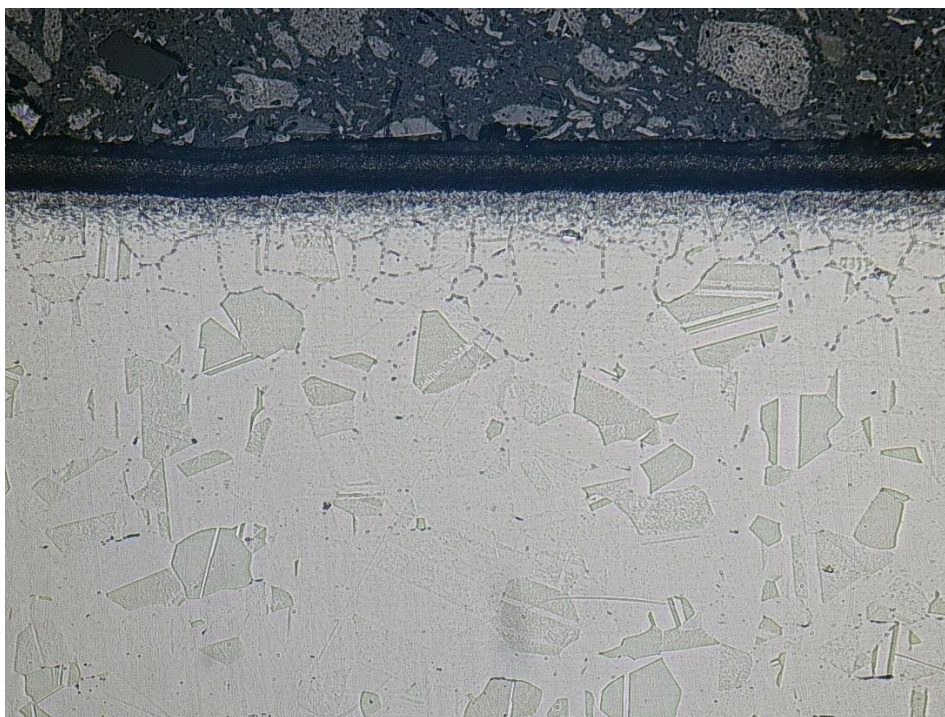


Slika 34. Uzorci boriranog čelika X5CrNiMo17-12-2 pripremljeni za metalografsku analizu

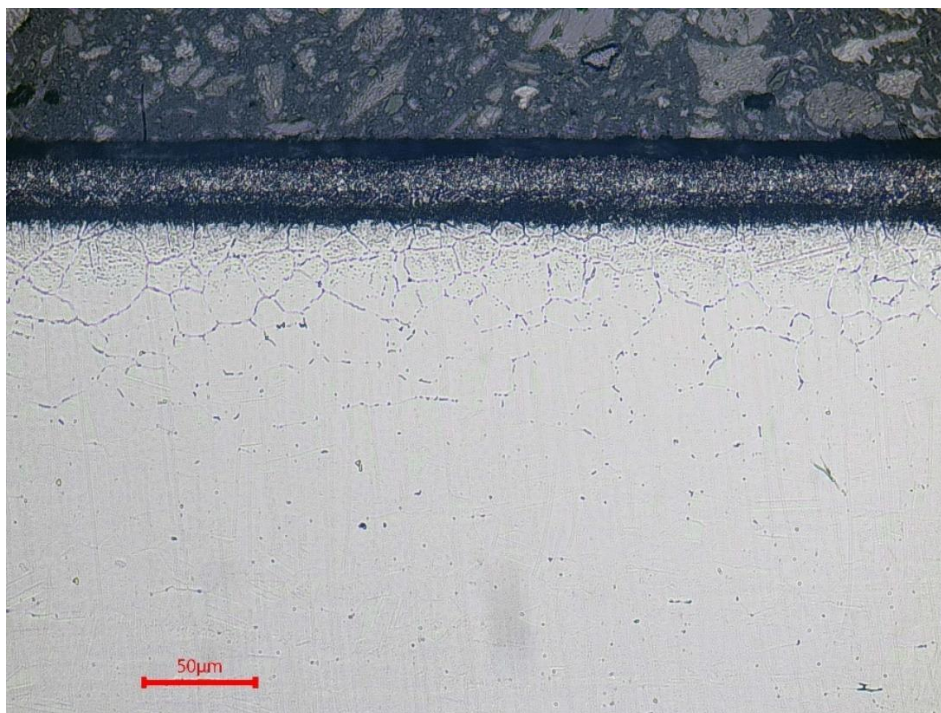
S lijeva na desno redom su uzorci B21, B31 i B41.

Analiza mikrostrukture i mjerenje debljine boridnih slojeva provedeno je svjetlosnim mikroskopom. Slike 35., 36. i 37. pokazuju mikrostrukturu uzoraka B21, B31 i B41.

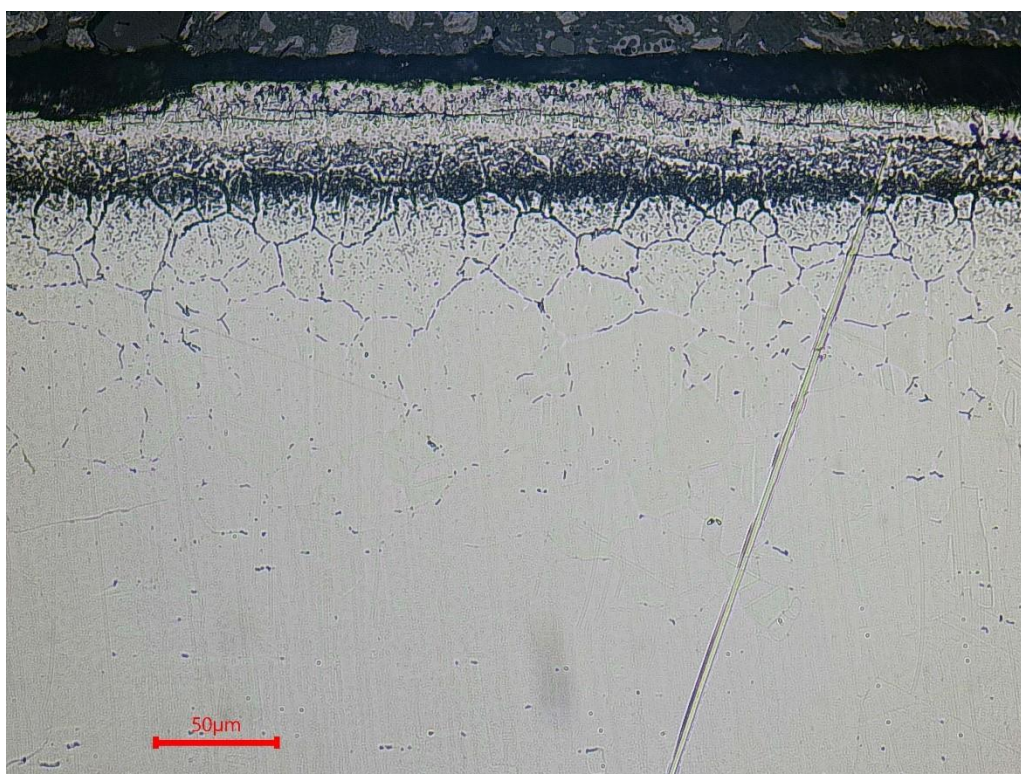
Na slikama je vidljivo kako je prilikom boriranja od 2 sata i od 3 sata nastala monofazna Fe_2B struktura sloja, dok je na uzorku B41 koji je boriran 4 sata nastala dvofazna struktura. Ispod boridnog sloja uočavaju se boridi izlučeni po granicama austenitnih zrna. U dvofaznoj strukturi borida na uzorku B41 vidljive su mikropukotine paralelne s površinom uzorka na granici slojeva borida.



Slika 35. Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B21

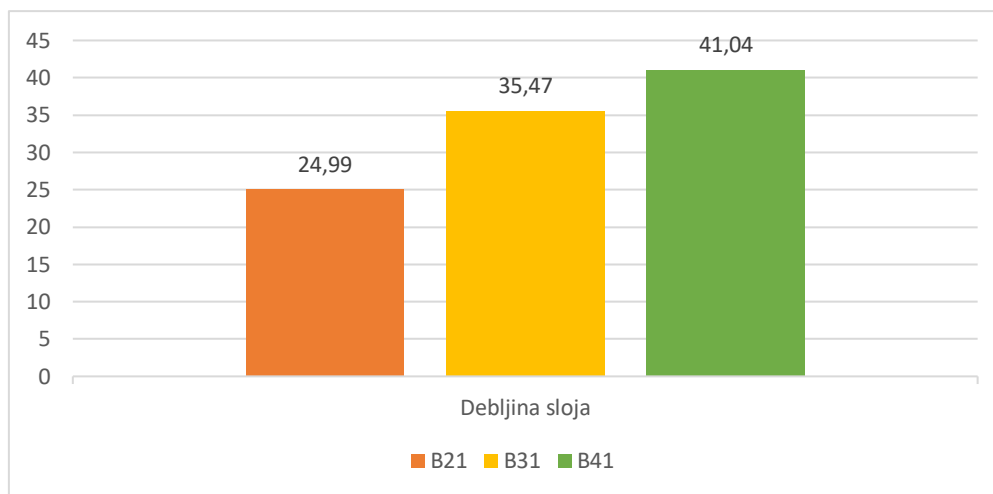


Slika 36. Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B31



Slika 37. Mikrostruktura boridnog sloja na uzorku B41 s pojavom mikropukotina

Dijagram na slici 38. pokazuje prosječnu vrijednost dubine boridnog sloja u μm dobivene mjerenjem debljine na slikama rubnog sloja.



Slika 38. Debljina boridnog sloja na čeliku X5CrNiMo17-12-2

Uzorak B31 ima srednju debljinu sloja 35,47 μm čime je potvrđena pretpostavka iz poglavlja 7.2. Uzorak B41 ima najdeblji boridni sloj iz čega možemo zaključiti da debljina boridnog sloja ovisi o duljini boriranja. Međutim, nastanak boridnog sloja na uzorku B41 praćen je pojavom mikropukotina, unatoč vrlo sporom hlađenju u peći s temperature boriranja (brzinom manjom od 50 K/h).

7.5. Ispitivanje otpornosti borida na mikroabraziju

Ispitivanje otpornosti boridnog sloja na mikroabraziju provedeno je na kalotesteru metodom opisanom u poglavlju 4. Kuglica promjera 20 mm vrtila se brzinom 300 okr/min, kut nagiba uzorka prema horizontalnoj ravnini iznosio je 54°. Korištena je abrazivna suspenzija Strauers DP s dijamantnim zrcima veličine 3 μm . Trošenje se ispitivalo tokom različitih vremena ispitivanja: 10, 20, 30, 40, 50, 60 i 90 s.

Na slikama 39., 40. i 41. vidljive su kalote nastale na uzorku boriranom 2 h.



Slika 39. Kalota na uzorku B21 trošenom 10 s

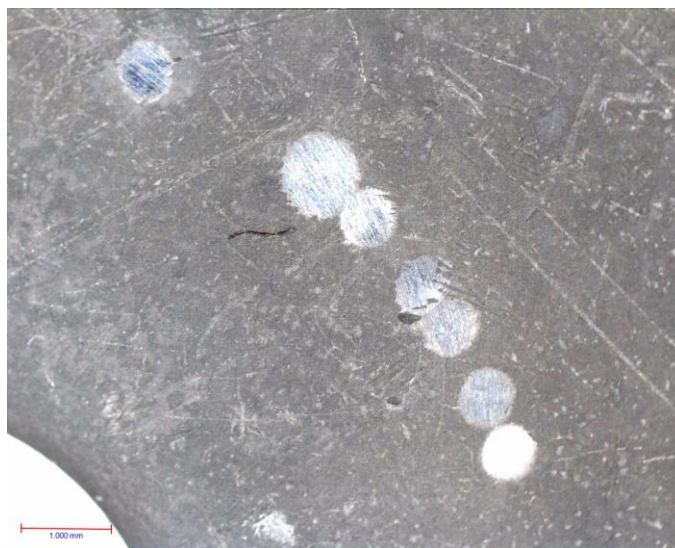


Slika 40. Uzorak B21 trošen 20-60 s



Slika 41. Uzorak B21 trošen 90 s

Na slici 42. prikazane su kalote B31 uzorka.



Slika 42. Uzorak B31 trošen 10-90 s

Na slici 43. prikazane su kalote B41 uzorka.



Slika 43. Uzorak B41 trošen 10-90 s

U tablici 9. prikazani su rezultati ispitivanja, promjer i površina kalote, pomoću kojih će se izračunati volumen i dubina kalote.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja otpornosti boriranih uzoraka na mikroabraziju

Vrijeme, s	B21		B31		B41	
	d , mm	S , mm ²	d , mm	S , mm ²	d , mm	S , mm ²
10	0,628	0,310	0,517	0,210	0,748	0,439
20	0,683	0,366	0,325	0,083	0,861	0,582
30	0,691	0,374	0,329	0,085	0,897	0,632
40	0,712	0,398	0,424	0,141	0,921	0,666
50	0,704	0,390	0,448	0,157	0,869	0,593
60	0,963	0,728	0,454	0,162	0,964	0,730
90	0,593	0,276	0,587	0,270	1,106	0,960

Za izračun gubitka volumena koristi se jednadžba:

$$V \approx \frac{\pi d^4}{64D} \quad (15)$$

Gdje je:

- V – volumen kalote, mm³
- d – promjer kalote, mm
- D – radijus kuglice, mm

Dubina kalote računa se pomoću izraza:

$$h \approx \sqrt{\frac{V}{\pi D}} \quad (16)$$

gdje je:

- h – dubina kalote, mm

U tablici 10. prikazani su volumen i dubina kalote za sva mjerenja trošenja dobiveni koristeći izraze (15) i (16).

Tablica 11. Rezultati analize dubine i volumena kalote u boriranom sloju

Vrijeme, s	B21		B31		B41	
	V , mm ³	h , mm	V , mm ³	h , mm	V , mm ³	h , mm
10	$3,08 \times 10^{-3}$	$9,90 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$8,99 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	0,01081

20	$3,35 \times 10^{-3}$	0,01033	$1,60 \times 10^{-3}$	$7,14 \times 10^{-3}$	$4,23 \times 10^{-3}$	0,01160
30	$3,39 \times 10^{-3}$	0,01039	$1,62 \times 10^{-3}$	$7,18 \times 10^{-3}$	$4,40 \times 10^{-3}$	0,01183
40	$3,50 \times 10^{-3}$	0,01056	$2,08 \times 10^{-3}$	$8,14 \times 10^{-3}$	$4,52 \times 10^{-3}$	0,01199
50	$3,46 \times 10^{-3}$	0,01049	$2,20 \times 10^{-3}$	$8,37 \times 10^{-3}$	$4,27 \times 10^{-3}$	0,01166
60	$4,73 \times 10^{-3}$	0,01227	$2,23 \times 10^{-3}$	$8,43 \times 10^{-3}$	$4,73 \times 10^{-3}$	0,01227
90	$2,91 \times 10^{-3}$	$9,62 \times 10^{-3}$	$2,88 \times 10^{-3}$	$9,57 \times 10^{-3}$	$5,43 \times 10^{-3}$	0,01315

U provedenom mikroabrazijskom trošenju u trajanju od 90 s nije došlo do probijanja boridnih slojeva. Stoga su rezultati mikroabrazijskog ispitivanja uzrokovani isključivo svojstvima ispitivanih boridnih slojeva. Iz tablice 10. je vidljivo kako je na trošenje kalotestom bio najosjetljiviji uzorak boriran 4 sata, dok je najmanje trošenje pokazao uzorak boriran 3 sata. Povećano trošenje uzorka B41 posljedica je prisutnosti mikropukotina u boridnom sloju. Veće trošenje uzorka B21 u odnosu na uzorak B31 posljedica je niže tvrdoće borida na uzorku B21 boriranom 2 h u odnosu na uzorak B31 boriran 3 h.

8. ZAKLJUČAK

Provedeno je boriranje u prašku X5CrNiMo17-12-2 čelika pri različitim vremenima boriranja kako bi se vidio utjecaj trajanja boriranja na tvrdoću, mikrostrukturu i debljinu boridnog sloja te utjecaj na mikroabrazivno trošenje.

Povećanjem trajanja boriranja dolazi do povećanja tvrdoće i debljine boridnog sloja. Kod uzoraka boriranih 2 i 3 sata dobivena je monofazna Fe₂B struktura, dok je kod najdulje boriranog uzorka nastala i krhka FeB faza koja utječe na otpornost na mikroabraziju. Uzorak boriran 4 sata pokazao je najmanju otpornost prema mikroabraziji.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da je optimalno trajanje boriranja 3 sata, no i nakon 2 sata dobiju se odlična svojstva.

U daljnjim ispitivanjima preporučuje se ispitati otpornost na elektrokemijsku koroziju boridnih slojeva u raznim agresivnim medijima i potvrditi prisutnost monosloja borida XRD metodom.

LITERATURA

- [1] Bell, T.: Surface Engineering: Past, Present and Future, 2016., 31. - 40. str.
- [2] <https://tehnika.lzmk.hr/inzenjerstvo-povrsina/>
- [3] ASM International: A Review of Stainless Steels: What They Are; What They Do, 10., 16. str.
- [4] McGuire, M. F.: Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 406. - 411. str.
- [5] Rede V.; Skripta iz kolegija „Posebni metalni materijali“, dio „Nehrđajući čelici“, FSB
- [6] <https://www.tachart.com/material/x5crnimo17-12-2/>
- [7] https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=106
- [8] <https://matmatch.com/learn/material/aisi-316-stainless-steel>
- [9] Zimmerman C.; ASM Handbook, Steel heat treating fundamentals and processes, 2013., 710.-722. str.
- [10] Dybkov V.I.; Basics of formation of iron boride coatings, Journal of mineral metal and material engineering, 2016, 30-46 str
- [11] Milinović A., Krumes D., Marković R.; An investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels, Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod. Tehnički vjesnik, 19, 2012., 27-31
- [12] Matijević B.; Predavanja iz kolegija “Tribologija i inženjerstvo površina“, dio Inženjerstvo površina, FSB
- [13] Zhong J., Qin W., Wang X., Medvedovski E., Szpunar J.A., Guan K.; Mechanism of Texture Formation in Iron Boride Coatings on Low-Carbon Steel
- [14] Selcuk B., Ipek R., Karmis M.B.; A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels, Journal of Materials Processing Technology 141, 2003. 189.–196. str.
- [15] Yan P.X., Zhang X.M., Xu J.W., Wu Z.G., Song Q.M.; High-temperature behavior of the boride layer of 45# carbon steel, Materials chemistry and physics 71, 2001. 107.–110 .str
- [16] Medvedovski E., Antonov M.; Erosion studies of the iron boride coatings for protection of tubing components in oil production, mineral processing and engineering applications, Wear, 2020., 452.-453. str.
- [17] Grilec, K.; Predavanja iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, dio Tribologija, predavanje Mehanizmi trošenja, FSB
- [18] Grilec, K.; Predavanja iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, dio Tribologija, predavanje Procesi trošenja, FSB

-
- [19] Gee, M. G. et al.; Progress towards standardisation of ball cratering, *Wear*, 2003., 1. – 13. str.
- [20] Landek, D.; Kurtela, M.; Stojanović, I.; Jačan, J.; Jakovljević, S. Corrosion and Micro-Abrasion Properties of an AISI 316L Austenitic Stainless Steel after Low-Temperature Plasma Nitriding. *Coatings*, 2023
- [21] Jelaska, D.; Elementi strojeva: skripta za studente Industrijskog inženjerstva, Split, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Sveučilište u Splitu, 2005.
- [22] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček i L. Ćurković; *Materijali 1*, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 2014., 77. – 82. str.

PRILOZI

I. Rezultati mjerenja debljine boridnog sloja

	B21, μm	B31, μm	B41, μm
1	35,91	28,01	42,09
2	35,40	24,93	39,17
3	34,38	23,88	43,30
4	34,36	23,90	39,01
5	36,43	24,92	41,75
6	35,91	24,93	41,24
7	35,97	24,40	40,72