

Ispitivanje tribokorozije boriranog čelika C45 rotirajućom kuglicom

Rimac, Damjan

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:864123>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Damjan Rimac

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Damjan Rimac

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku i asistentu mag. ing. mech. Josipu Cerovečkom, na dobrim savjetima, velikom trudu, strpljenju i pomoći.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori tijekom cijelog studiranja.

Damjan Rimac



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 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Damjan Rimac** JMBAG: **0035234563**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje tribokorozije boriranog čelika C45 rotirajućom kuglicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tribocorrosion testing of borided steel C45 with a rotating ball**

Opis zadatka:

Boriranjem u prašku ili pastu se proizvode površinski slojevi povišene otpornosti na trošenje i koroziju. Sastav i debljina boridnog sloja ovise o vrsti čelika i parametrima boriranja te naknadnoj toplinskoj obradi. U radu treba opisati svojstva i mikrostrukturu borida na konstrukcijskim ugljičnim čelicima te navesti tipične primjere primjene boriranja. Za karakterizaciju svojstava boridnog 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 ugljičnog čelika C45 kojima će se postići dvije različite debljine boridnog sloja. Na boriranim uzorcima provesti ispitivanja hrapavosti i mikrotvrdoće površine. Za ispitivanja otpornosti boriranog sloja na tribokoroziju provesti pokus s izlaganjem boriranih uzorka 3,5 %-tnoj otopini NaCl u vodi prije i nakon ispitivanja mikroabrazijskog trošenja slobodno rotirajućom kuglicom. Na temelju rezultata ispitivanja zaključiti o utjecaju izlaganja boridnog sloja elektrokemijskoj koroziji na otpornost mikroabrazijskom trošenju.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. BORIRANJE	2
2.1. Medij za boriranje	2
2.1.1. Boriranje u prašku	2
2.1.2. Boriranje pastom	3
2.1.3. Boriranje u plinu	4
2.1.4. Boriranje u tekućem sredstvu	4
2.1.5. Naknadna obrada boriranih predmeta	4
2.2. Boridni sloj	5
2.2.1. Boridi	5
2.2.2. Model rasta boridnog sloja	8
2.2.3. Svojstva boridnog sloja	11
2.2.3.1. Tvrdća i otpornost na trošenje	12
2.2.3.2. Postojanost borida prema povišenim temperaturama	15
2.2.3.3. Otpornost borida na djelovanje kiselina i lužina	16
2.2.3.4. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva borida	17
2.2.3.5. Debljina boridnog sloja	18
2.3. Primjena boriranja	20
3. KARAKTERIZACIJA SVOJSTAVA	21
3.1. Ispitivanje hrapavosti površine	21
3.3. Ispitivanje otpornosti na mikroabraziju slobodno rotirajućom kuglicom	24
4. PLAN I PRIPREMA POKUSA	27
4.1. Boriranje	27
4.2. Priprema otopine	28
5. REZULTATI ISPITIVANJA	30
5.1. Hrapavost površine	30
5.2. Tvrdća	32
5.3. Trošenje mikroabrazijom	33
5.4. Izgled borirane površine nakon korozije	39
6. ZAKLJUČAK	41
LITERATURA	42
PRILOZI	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Priprema obratka za boriranje u prašku [2]	3
Slika 2.	Debljina boridnog sloja ovisna o vremenu boriranja na temperaturi 900°C u prašku Durborid G [3]	3
Slika 3.	Debljina boridnog sloja ovisna o vremenu boriranja na temperaturi 900°C u pasti Durborid [3]	4
Slika 4.	(a) Mikrostruktura i raspored tvrdoće na boriranom uzorku od čelika C45 (Fe ₂ B) ...	5
Slika 5.	Kristalne rešetke Fe ₂ B i FeB [2]	6
Slika 6.	Prikaz propagiranja pukotine duž sučelja FeB i Fe ₂ B sloja na čeliku [6]	7
Slika 7.	Pucanje dvofaznog sloja FeB i Fe ₂ B borida na kutu čelika C45 gdje je vanjski dio boridnog sloja puca s površine ugla. (boriran na 927°C, 6h) [7]	8
Slika 8.	Shematski dijagram prikazuje proces rasta slojeva FeB i Fe ₂ B u uvjetima kontrole kemijskom reakcijom [9]	9
Slika 9.	Shematski dijagram prikazuje proces rasta slojeva FeB i Fe ₂ B u uvjetima kontrole difuzijom [9]	10
Slika 10.	Profili mikrotvrdoće uzoraka boriranih na 1000°C za 4 h u mješavinama M2 i M3. [10]	13
Slika 11.	Utjecaj boriranja na otpornost na trošenje [7]	14
Slika 12.	Krivulje trošenja boriranog čelika te čelika podvrgnutim drugim postupcima, na različitim vrijednostima primijenjenog opterećenja: (a) 5N i (b) 25N [6]	15
Slika 13.	Mikrostrukture boridnih slojeva izlagane visokim temperaturama kroz 30 dana [7]	16
Slika 14.	Korozijski utjecaj kiselina na borirani i neborirani C45 čelik [7]	17
Slika 15.	Utjecaj legirnih elemenata na debljinu boridnog sloja [7]	17
Slika 16.	Mikrostruktura i raspored tvrdoće na boriranom čeliku X38CrMoV5 1 [2]	18
Slika 17.	Omjer debljine boridnog sloja/porasta dimenzija [8]	19
Slika 18.	Porast parametra <i>Ra</i> prije i nakon postupka boriranja za različite pripreme površine [8]	19
Slika 19.	Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednje aritmetičko odstupanje <i>Ra</i> [11]	21
Slika 20.	Procjena hrapavosti koristeći srednju visinu neravnina <i>Rz</i> [11]	22
Slika 21.	Ispitivanje tvrdoće metodom po Vickersu (HV):a) princip ispitivanja, b) položaj indentora i njegov otisak u ispitivanom materijalu [12]	23
Slika 22.	Karakteristične mjere kuglice i otiska kalote [13]	24
Slika 23.	Princip ispitivanja mikroabrazije slobodno rotirajućom kuglicom. Opterećenje trošene površine određeno je težinom kuglice [13]	25
Slika 24.	Princip ispitivanja mikroabrazije kuglicom učvršćenom na vratilo. Opterećenje trošene površine određeno je polugom i utegom [13]	25
Slika 25.	Kalotester Tribotechnic sa slobodno rotirajućom kuglicom	26
Slika 26.	Dijagram postupka boriranja	28
Slika 27.	Borirani uzorci	28
Slika 28.	Uređaj (TIME 3202) i postolje (TIME A202) za ispitivanje hrapavosti površine	30
Slika 29.	Usporedba vrijednosti parametara hrapavosti boriranih uzoraka	30
Slika 30.	Profili hrapavosti boriranih uzoraka	31
Slika 31.	Tvrdoća površine boriranih uzoraka prije i nakon izlaganja 3,5% -tnoj otopini NaCl u vodi	32
Slika 32.	Abrazivna suspenzija Struers DP 3	33
Slika 33.	Kalote na uzorku boriranom 2 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji	34

Slika 34.	Kalote na uzorku boriranom 3 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji	35
Slika 35.	Kalote na uzorku boriranom 4 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji	36
Slika 36.	Ovisnost promjera kalote o vremenu ispitivanja uzoraka prije izlaganja otopini	37
Slika 37.	Ovisnost volumena otiska o vremenu ispitivanja uzoraka prije izlaganja otopini	37
Slika 38.	Ovisnost promjera kalote o vremenu ispitivanja uzoraka poslije izlaganja otopini ..	38
Slika 39.	Ovisnost volumena otiska o vremenu ispitivanja uzoraka poslije izlaganja otopini .	38
Slika 40.	Korodirana površina uzorka boriranog 2 h.....	39
Slika 41.	Korodirana površina uzorka boriranog 3 h.....	40
Slika 42.	Korodirana površina uzorka boriranog 4 h.....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba fizikalnih svojstava željeznih borida [2]	6
Tablica 2. Utjecaj boridnog sredstva na udio faza u nastalom boridnom sloju [8]	8
Tablica 3. Površinske tvrdoće boriranih čelika uspoređene s drugim postupcima i tvrdim materijalima [7]	12
Tablica 4. Mikrotvrdoće čelika C20 i C45 te sastavi mješavina bora [10].....	13
Tablica 5. Kemijski sastav čelika C45 [14]	27
Tablica 6. Oznake polaznih i boriranih uzoraka C45 čelika	29
Tablica 7. Brzine trošenja uzoraka	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	mm	Polumjer sfernog otiska
d	mm	Debljina sloja
d	mm	Srednja vrijednost dijagonale baze piramide
D	m^2/s	Konstanta rasta sloja
Do	m^2/s	Faktor učestalosti preskoka atoma bora
F	N	Sila
φ	$^\circ$	Kut
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
l	mm	Mjerna duljina
n	-	Broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž l
Q	$kJ/kmol$	Energija aktivacije
R	$kJ/kmolK$	Plinska konstanta
R	mm	Polumjer kugle
Ra	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
$Rmax$	μm	Ukupna visina profila
Rz	μm	Srednja visina neravnina
t	s	Vrijeme
T	K	Temperatura
ϑ	$^\circ C$	Temperatura
V	mm^3	Volumen sfernog otiska (kalote)
x	μm	Dužina uzduž mjerne duljine
$y(x), y_i$	μm	Visina profila hrapavosti s obzirom na srednju ref. 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 različitim medijima i njegova primjena. Opisan je nastanak i rast boridnog sloja, njegova svojstva te faktori koji utječu na njih. Nadalje, dan je uvid u postupke ispitivanja hrapavosti površine, tvrdoće metodom Vickers te otpornosti na mikroabrazijsko trošenje.

U eksperimentalnom dijelu rada navedena je provedba boriranja i priprema otopine za izlaganje uzoraka koroziji. Provedeno je ispitivanje i analiza hrapavosti, tvrdoće boridnog sloja te otpornosti boriranog C45 čelika za različita vremena boriranja. Uspoređena su ispitana svojstva uzoraka prije i nakon njihovog izlaganja koroziji.

Ključne riječi: boriranje, boridni sloj, tvrdoća, mikroabrazijsko trošenje, korozija, čelik C45

SUMMARY

In the theoretical part of the paper, the boriding process in different media and its application are described. The formation and growth of the boride layer, its properties, and the factors influencing them are explained. Furthermore, an overview of surface roughness testing procedures, Vickers hardness testing, and resistance to micro-abrasive wear is provided.

In the experimental part of the paper, the boriding process and the preparation of the solution for exposing samples to corrosion are presented. The examination and analysis of roughness, hardness of the boride layer, and the resistance of borided C45 steel for different boriding times were conducted. The tested properties of the samples before and after exposure to corrosion were compared.

Keywords: boriding, boride layer, hardness, micro-abrasive wear, corrosion, C45 steel.

1. UVOD

Inženjerstvo površina (engl. „surface engineering“) je znanstveno - stručna disciplina koja se bavi postupcima ispitivanja i oplemenjivanja površina radi njihove zaštite od trošenja i korozije. Primjena inženjerstva površine utječe na stvaranje potpuno novih proizvoda, rješavanje inženjerskih problema koji su prije bili nerješivi, poboljšanje tehničke funkcionalnosti, očuvanje okoliša te smanjenje potrošnje energije i onečišćenja. Postupci zaštite površina u području inženjerstva površina dijele se na postupke modificiranja i prevlačenja. [1]

Toplinsko - kemijski postupci modificiranja površine provode se u odgovarajućim aktivnim medijima difuzijom nemetalnog ili metalnog elementa s ciljem promjene sastava i mikrostrukture površinskog sloja zbog poboljšanja određenih svojstava, najčešće otpornosti na trošenje i postojanosti na koroziju. Aktivni medij može biti granulat, pasta, solna kupka, plinska atmosfera ili plazma ioniziranih plinova. Toplinsko - kemijski postupci modificiranja površine čelika dijele se prema temperaturnom području provedbe. U feritnom području (na nižim temperaturama) provode se postupci nitriranja, nitrokarburiranja i oksinitrokarburiranja. U austenitnom području (na višim temperaturama) provode se procesi pougličavanja (cementiranja), karbonitriranja te boriranja [2]. U radu će se opisati postupak boriranja nelegiranog srednjeugličnog čelika i njegov utjecaj na povećanje tvrdoće i otpornosti na trošenje.

2. BORIRANJE

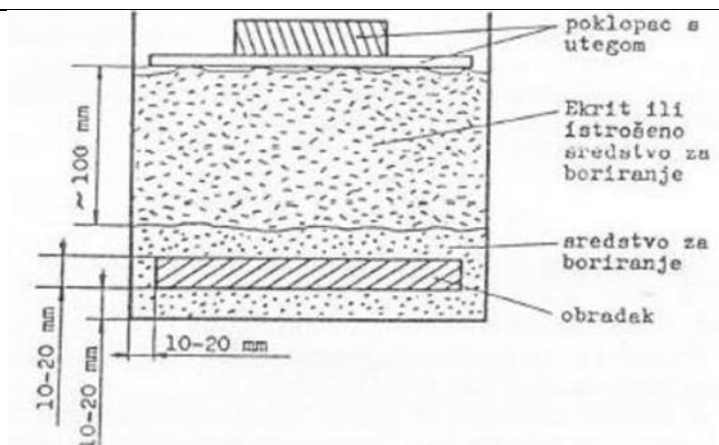
Boriranje je toplinsko-difuzijski proces u kojem atomi bora, zbog svog malog promjera i visoke pokretljivosti na povišenim temperaturama, difundiraju u površinu metala i stvaraju intermetalne spojeve s atomima osnovnog metala. Stvoreni sloj borida, koji može biti sastavljen od jedno- ili višefaznih borida, izuzetno je tvrd i povećava otpornost površinskog sloja na abrazijsko i adhezijsko trošenje i koroziju. Uz sve navedeno, podrazumijeva se da se pravilnim odabirom parametara i osnovnog materijala vijek trajanja boriranih dijelova i alata može produljiti za 3 do 10 puta. Iako je boriranje najprikladnije za ugljične i niskolegirane čelike, može se također primijeniti na legure na bazi Ni, Co, Ti, W i Mo te na sinterirane tvrde materijale. Boriranje čelika obično se provodi na temperaturama od 800 °C do 1100 °C i u trajanju do 12 sati. [3]

2.1. Medij za boriranje

Boriranje se provodi u prašku (granulatu), pasti, tekućim sredstvima i plinovima.

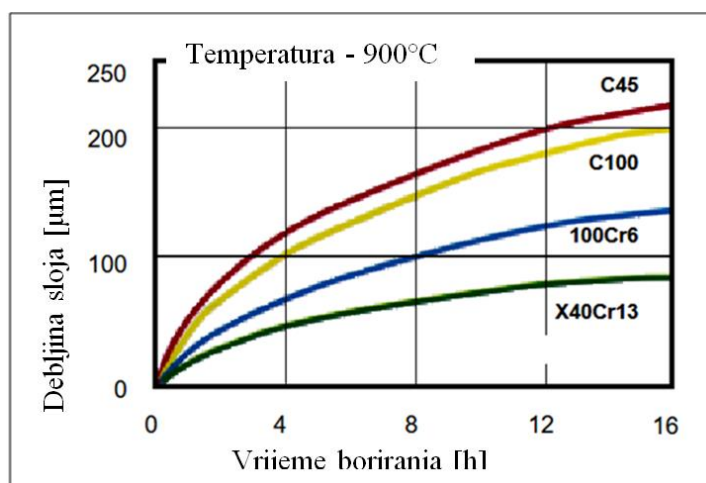
2.1.1. Boriranje u prašku

Boriranje u prašku je jedan od najviše korištenih postupaka jer je vrlo jednostavan za provedbu. U početku se kao sredstvo za boriranje koristio amorfni bor i druga sredstva kao aktivatori, ali su dobiveni slojevi bili tanki i porozni. Granulat koji se uobičajeno upotrebljava u današnje vrijeme sastoji se od borkarbida (B₄C) i boraksa, a kao aktivator služi kaliumfluoroborat (KBF₄). Postupak se provodi na slijedeći način: u kutiju, najčešće od vatrootpornog lima debljine od 3 do 5 mm, stavlja se obradak tako da sa svake strane oko bude 10 do 20 mm praška (slika 1). Nakon toga se stavlja oko 100 mm tzv ekrita da se spriječi pristup kisika za vrijeme procesa. Umjesto ekrita može se upotrijebiti i istrošeni prašak za boriranje. Na kutiju se stavlja poklopac s utegom. Tako pripremljena kutija s obratkom stavlja se u običnu komornu peć (bez zaštitne atmosfere) i ugrijava se na temperaturu boriranja. Nakon odgovarajućeg trajanja boriranja, kutija se vadi i ohlađuje zajedno s peći, a po potrebi se može provesti i naknadno direktno kaljenje. Priprema obratka je prikazana na Slika 1. [2]



Slika 1. Priprema obratka za boriranje u prašku [2]

Na slikama Slika 2. i Slika 3. prikazane su debljine boridnog sloja u ovisnosti o vremenu i temperaturi u procesima boriranja praškom i pastom.

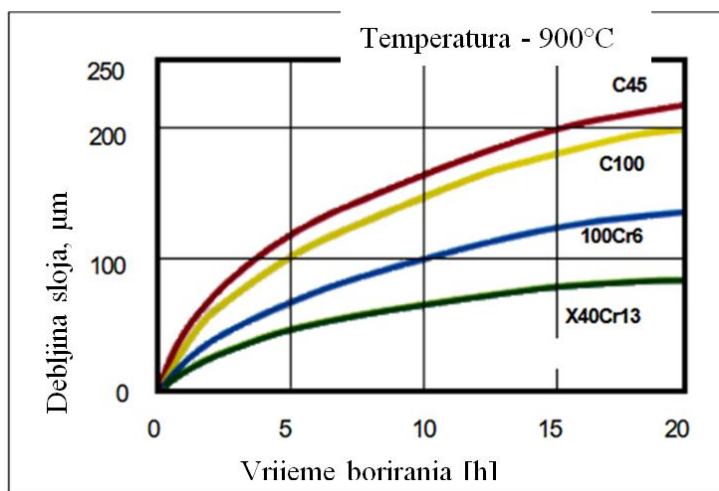


Slika 2. Debljina boridnog sloja ovisna o vremenu boriranja na temperaturi 900°C u prašku Durborid G [3]

2.1.2. Boriranje pastom

U novije vrijeme sve se više primjenjuje postupak boriranja pastom, pogotovo kada je u pitanju lokalno boriranje određenih površina (manji je utrošak sredstva za boriranje koje je vrlo skupo). Boriranje pastom provodi se tako da se pasta nanosi u određenoj debljini, obično 3 mm na površinu koju treba borirati. Za uspješnu provedbu boriranja potrebno je ugrijavanje tako priređenog obratka izvesti u zaštitnoj atmosferi (npr. u Ar, He, N ili nekoj smjesi zaštitnog plina), što je ujedno i glavni nedostatak ovog postupka.

Ukoliko se radi o potrebi parcijalnog boriranja nekog dijela, tada boriranje pastom ima čitav niz prednosti. Bitno je manja potrošnja paste od praška, jednostavnija je priprema, manja je potrošnja energije ugrijavanja te je moguća mehanizacija. [2]



Slika 3. Debljina boridnog sloja ovisna o vremenu boriranja na temperaturi 900°C u pasti Durborid [3]

2.1.3. Boriranje u plinu

Boriranje u plinu je brz i dobro upravljiv postupak, ali ima nekoliko nedostataka zbog kojih se rjeđe upotrebljava u praksi. Plinovita sredstva koja se upotrebljavaju za boriranje (borni hidrid i smjesa bornog triklorida s vodikom) vrlo su skupa, lako zapaljiva sa zrakom i sklona eksploziji te također vrlo otrovna. [2]

2.1.4. Boriranje u tekućem sredstvu

Boriranje u tekućem sredstvu provodi se u solnoj kupki sa ili bez elektrolize te u tekućoj otopini s visoko frekventnim indukcijskim ugrijavanjem. Kod postupka s elektrolizom upotrebljava se boraks. Ovaj postupak ima nedostataka jer se nakon vađenja i ohlađivanja obratka na njemu stvara čvrsto prijanjajuća kora od soli koju je poslije teško skinuti. Kod postupaka bez elektrolize, inertna solna kupka ne daje dobre rezultate, tako da se u praksi ne primjenjuje. [2]

2.1.5. Naknadna obrada boriranih predmeta

U svrhu povišenja čvrstoće osnovnog materijala, borirani obratci mogu se naknadno zakaliti. Kod kaljenja treba biti vrlo oprezan; s obzirom na temperaturu austenitizacije (ne ići iznad 1050 °C), treba primijeniti odgovarajuće sredstvo za gašenje. Temperatura austenitizacije odabire se prema čeliku. Za gašenje se ne preporučuje voda jer dolazi do pucanja boridnog

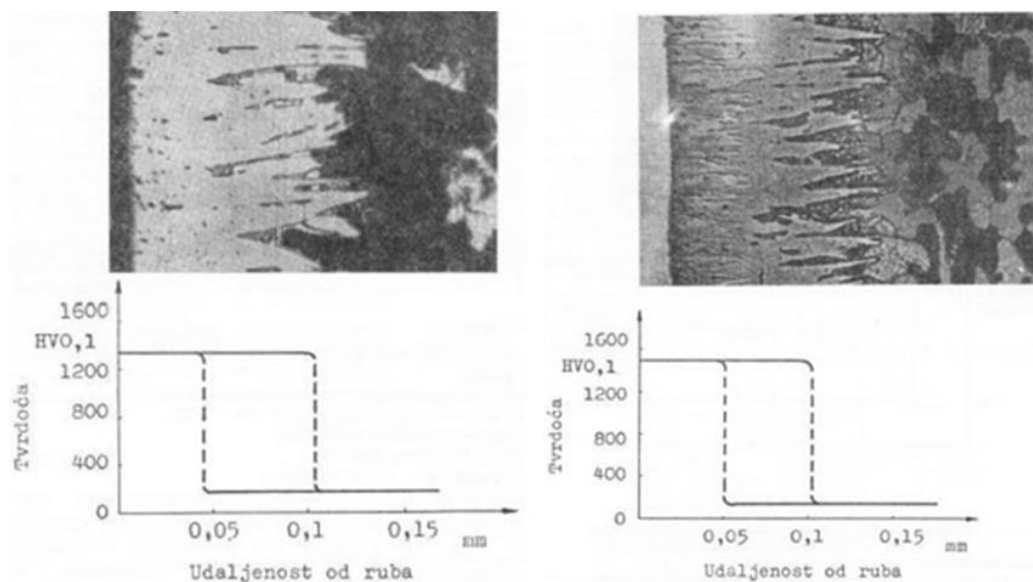
sloja pa treba izabrati blaže sredstvo za gašenje (ulje, solne kupke, zrak, tehnički plinovi). Prilikom austenitizacije boridni sloj treba zaštititi od oksidacije (zaštitnom atmosferom ili inertnom solnom kupkom). [2]

2.2. Boridni sloj

2.2.1. Boridi

Dobiveni površinski sloj, s karakterističnom morfologijom nalik zupcima, može se sastojati od jedne faze željeznog borida (FeB) ili može biti dvofazni ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$). Iako je FeB tvrdi od Fe_2B , smatra se nepoželjnim zbog svoje krhkosti. [4]

Na slici Slika 4. a prikazan je uzorak na kojem je dobiven monofazni boridni sloj Fe_2B . Na slici 4.b prikazan je dvofazni sloj (Fe_2B i FeB) borirani sloj na čeliku C20(b).

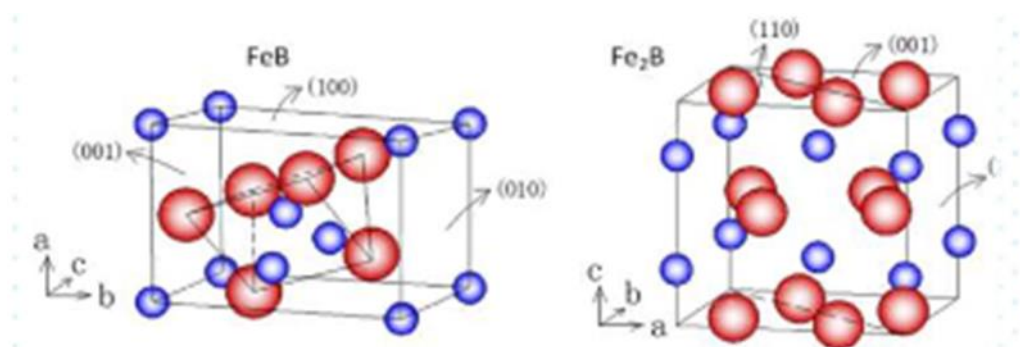


Slika 4. (a) Mikrostruktura i raspored tvrdoće na boriranom uzorku od čelika C45 (Fe_2B)
(b) Mikrostruktura i raspored tvrdoće na boriranom uzorku od čelika C20 (FeB i Fe_2B) [2]

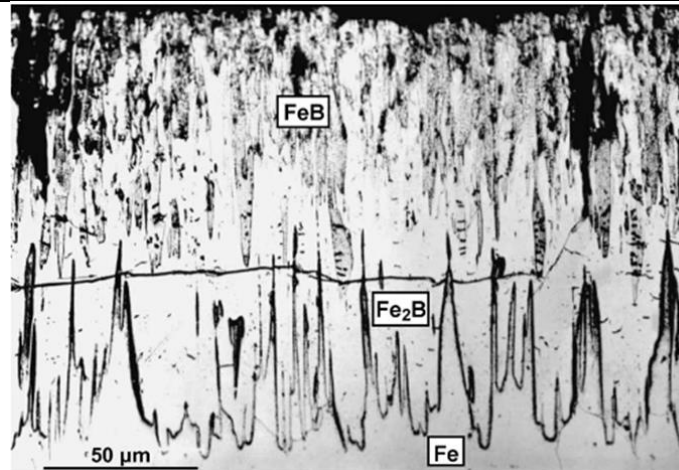
Usporedba fizikalnih svojstava Fe_2B i FeB prikazana je u Tablica 1. Na Slika 5. prikazane su kristalne rešetke željeznih borida.

Tablica 1. Usporedba fizikalnih svojstava željeznih borida [2]

	FeB	Fe ₂ B
% bora	16,23	8,83
Kristalna rešetka	rompska	Tetragonska
Naprezanje nakon hlađenja	Vlačna	tlačna
Toplinska rastezljivost ($10^{-6}K^{-1}$)	23	7,9 – 9,2
Tvrdoća (HV 0,1)	1900 – 2100	1800 – 2000
Gustoća (g/cm^3)	6,75	7,43
Modul elastičnosti (GPa)	343	284
Toplinska vodljivost (W/mK)	12	30

Slika 5. Kristalne rešetke Fe₂B i FeB [2]

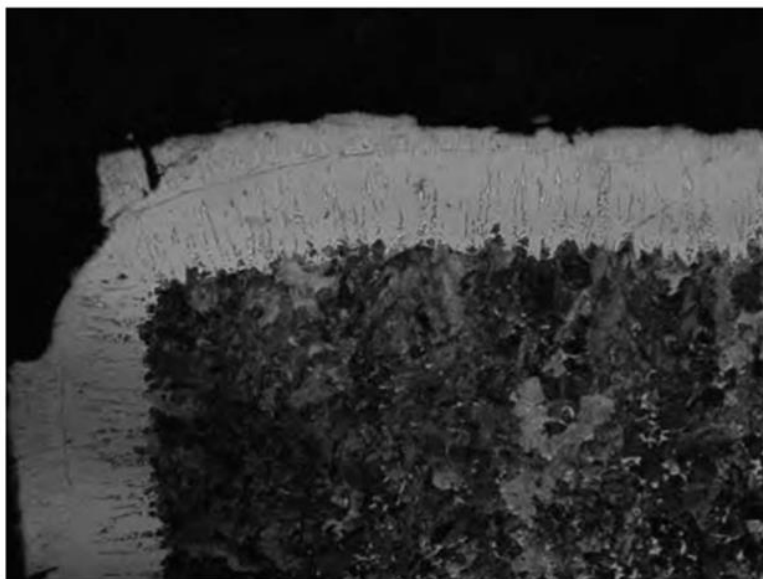
Zbog razlike u koeficijentima toplinskog istezanja (paralelno s površinom) slojeva borida u rasponu od 200 do 600°C, hlađenje nakon boriranja dovodi do vlačnih naprezanja u FeB sloju i tlačnih naprezanja u Fe₂B sloju (oba naprezanja su paralelna s boriranom površinom). Kada je udio FeB u ukupnoj debljini boridnog sloja velik, razlika u deformaciji može dovesti do pukotina na granici između dvaju borida, kao što je prikazano na Slika 6. [5]



Slika 6. Prikaz propagiranja pukotine duž sučelja FeB i Fe₂B sloja na čeliku [6]

Iz navedenih razloga je stoga bitno spriječiti/ukloniti dvofaznost, a to možemo postići [7]:

- Smanjenjem trajanja i temperature boriranja
- Korištenjem boridnog sredstva s manjim udjelom bora. Smanjuje se mogućnost da koncentracija bora dosegne 50% potrebnih za stvaranje FeB
- Upotrebom čelika s manjim udjelom legirnih elemenata. Legirni elementi usporavaju difuziju bora što dovodi do sakupljanja bora na površini i stvaranja FeB faze.
- Konstrukcijskim oblikovanjem, odnosno izbjegavanjem oštih rubova i tankih površina. Takvi dijelovi su izloženi velikim koncentracijama bora zbog difuzije bora iz više uglova. Slika 7. prikazuje takav slučaj na konstrukcijskom ugljičnom čeliku.



Slika 7. Pucanje dvofaznog sloja FeB i Fe₂B borida na kutu čelika C45 gdje je vanjski dio boridnog sloja puca s površine uglja. (boriran na 927°C, 6h) [7]

Kemijski sastav sredstva za boriranje značajno utječe na sastav boridnog sloja. Tablica 2. prikazuje sastave praškastog sredstva za boriranje i utjecaj na stvaranje borida na površini čelika. [8]

Tablica 2. Utjecaj boridnog sredstva na udio faza u nastalom boridnom sloju [8]

Vrsta čelika	Udio borovog karbida u sredstvu za boriranje [maseni %]			
	2,5	5	7,5	10
C15	Fe ₂ B	Fe ₂ B	FeB u kutevima	Nepotpuni FeB
C45	Fe ₂ B	Fe ₂ B	FeB u kutevima	Nepotpuni FeB
42CrMo4	Fe ₂ B	FeB u kutevima	Fe ₂ B+FeB	Nepotpuni FeB
61CrSiV5	Fe ₂ B	FeB u kutevima	Fe ₂ B+FeB	FeB
C100	Fe ₂ B	FeB u kutevima	Fe ₂ B+FeB	FeB
100Cr6	Fe ₂ B	Fe ₂ B+FeB	FeB	FeB
145Cr6	FeB u kutevima	Fe ₂ B+FeB	FeB	FeB
X40Cr13	FeB	FeB	FeB	FeB
18Cr-8Ni	FeB	FeB	FeB	FeB

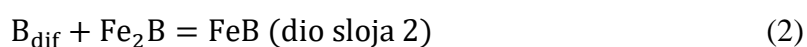
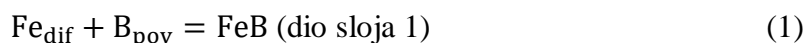
2.2.2. Model rasta boridnog sloja

Proces boriranja sastoji se od dvije reakcije: nukleacije borida i rasta boridnog sloja. Prva reakcija događa se između površine materijala i tvari bogate borom. Stopa nukleacije čestica na površini materijala ovisi o trajanju i temperaturi boriranja. Druga reakcija je kontrolirana difuzijom i određuje konačnu debljinu sloja. [7]

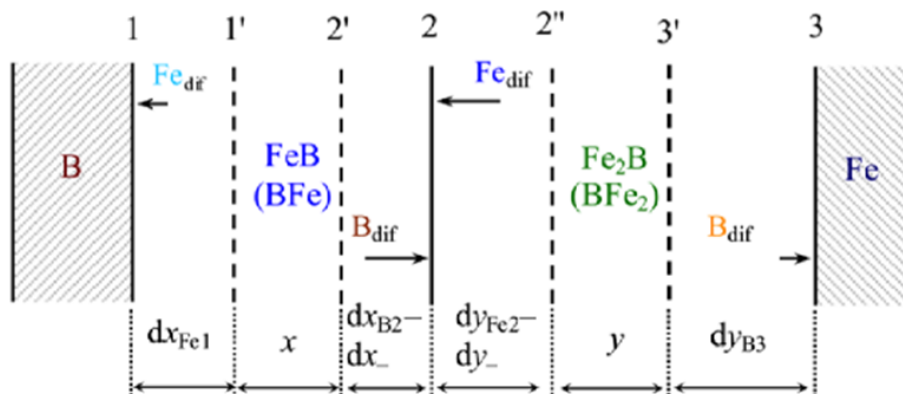
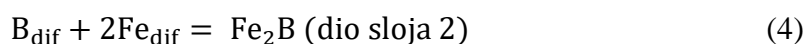
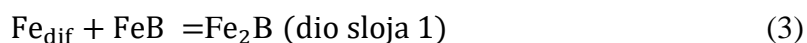
Općenito, kada se na nekim točkama površine čelika postigne odgovarajuća koncentracija bora, počinje nukleacija Fe₂B kristala čime se dobiva površinski sloj sastavljen od Fe₂B, ispod kojeg se nalazi široka difuzijska zona bora. Nukleacija i rast FeB faze na površinskom dijelu čelika posljedica su povišene koncentracije bora, u odnosu na nukleaciju borida Fe₂B. Izlučivanje borida FeB također pospješuje viša temperatura boriranja. [5]

U trenutku kada brzina difuzije reaktanata postane veća od brzine kemijskih reakcija, rast FeB i Fe₂B odvija se kemijskim reakcijama (shematski prikaz na Slika 8.) [9]:

FeB:



Fe₂B:

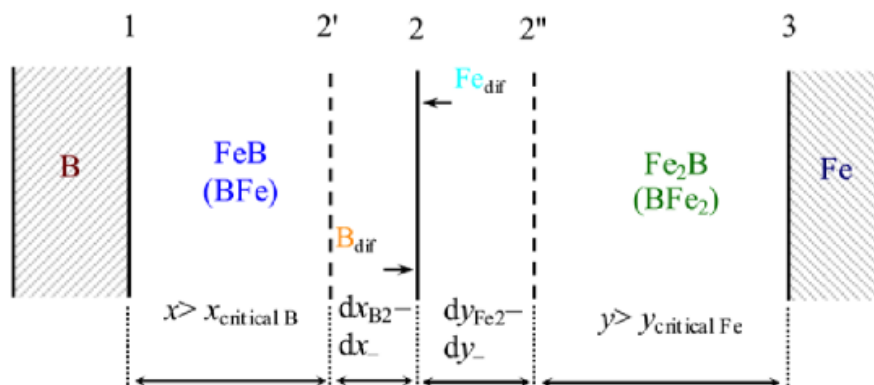


Slika 8. Shematski dijagram prikazuje proces rasta slojeva FeB i Fe₂B u uvjetima kontrole kemijskom reakcijom [9]

Strelicama je prikazan smjer difuzije atoma, a duljinama smanjenje broja difundiranih atoma s povećanjem udaljenosti od jezgri. Atomi bora koji nisu reagirali s Fe₂B na dijelu boridnog sloja 2, difundiraju na dio sloja 3 i reagiraju sa površinskim atomima željeza. Slično vrijedi i za atome željeza. Atomi željeza koji nisu ušli u kemijsku reakciju s FeB na dijelu sloja 2, difundiraju do sloja 1 i ulaze u kemijske reakcije sa površinskim atomima bora.

S povećanjem debljine FeB i Fe₂B slojeva, javlja se promjena mehanizma rasta. Proces više nije kontroliran kemijskim reakcijama, već difuzijom. Takva promjena nastupa u trenutku kada brzina kemijskih reakcija postane veća od brzine difundiranih atoma na mjestu reakcija.

Takva promjena nastupa pri kritičnim debljinama slojeva FeB i Fe₂B. U trenutku kada FeB sloj dosegne kritičnu vrijednost, Fe₂B sloj gubi izvor atoma bora i prestaje rasti. Isto vrijedi i kada Fe₂B dosegne određenu kritičnu vrijednost pri kojoj FeB sloj gubi izvor atoma željeza. Na Slika 9. Prikazan je rast u uvjetima kontrole procesa difuzijom bora. [9]



Slika 9. Shematski dijagram prikazuje proces rasta slojeva FeB i Fe₂B u uvjetima kontrole difuzijom [9]

Debljina boridnog sloja proporcionalna je konstanti brzine rasta sloja i kvadratnom korijenu vremena boriranja [8]:

$$d = D\sqrt{t}, \quad (5)$$

gdje je:

- d – debljina sloja [m],
- D – konstanta rasta sloja [m²/s],
- t – vrijeme [s] .

Rast boridnog sloja je toplinski aktivan proces. Njegova se brzina može opisati Arrheniusovim zakonom [8]:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (6)$$

gdje je:

- D_0 – faktor učestalosti preskoka atoma bora između ravnina kristalne rešetke [m²/s],
- Q – energija aktivacije [kJ/kmol],
- R – plinska konstanta [kJ/kmolK],
- T – temperatura [K] .

Umnožak plinske konstante i temperature jednak je iznosu prosječne kinetičke energije, iz čega slijedi da je izraz u eksponentu jednadžbe (6) omjer aktivacije i srednje kinetičke energije. Što je ovaj omjer veći, konstanta rasta sloja je manja. Prirodnim logaritmiranjem jednadžbe (6) dobije se linearna jednadžba iz koje se može odrediti aktivacijska energija i konstanta rasta borida za zadanu temperaturu, vrijeme boriranja i debljinu borida određenu svjetlosnom mikroskopijom. Jednadžba glasi [8]:

$$\ln D = \ln D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (7)$$

Uvrštavanjem eksperimentalno određenih veličina Q i D_0 u jednadžbu (6) te potom u jednadžbu (5), moguće je predvidjeti debljinu boridnog sloja za zadani čelik, temperaturu i vrijeme boriranja. [8]

2.2.3. Svojstva boridnog sloja

Borirani dijelovi imat će, uz nešto nižu žilavost i savojnu čvrstoću čvrstoću, sljedeća svojstva [2]:

- Vrlo visoku tvrdoću
- Visoku otpornost prema trošenju
- Postojanost prema višim temperaturama
- Nisku sklonost hladnom zavarivanju
- Otpornost prema kiselinama i lužinama

Dubina i kvaliteta boridnog sloja ovisiti će o [2]:

- Vrsti čelika koji se borira
- Trajanju boriranja
- Temperaturi boriranja
- Sredstvu za boriranje
- Brzini ugrijavanja i ohlađivanja
- Naknadnoj toplinskoj obradi

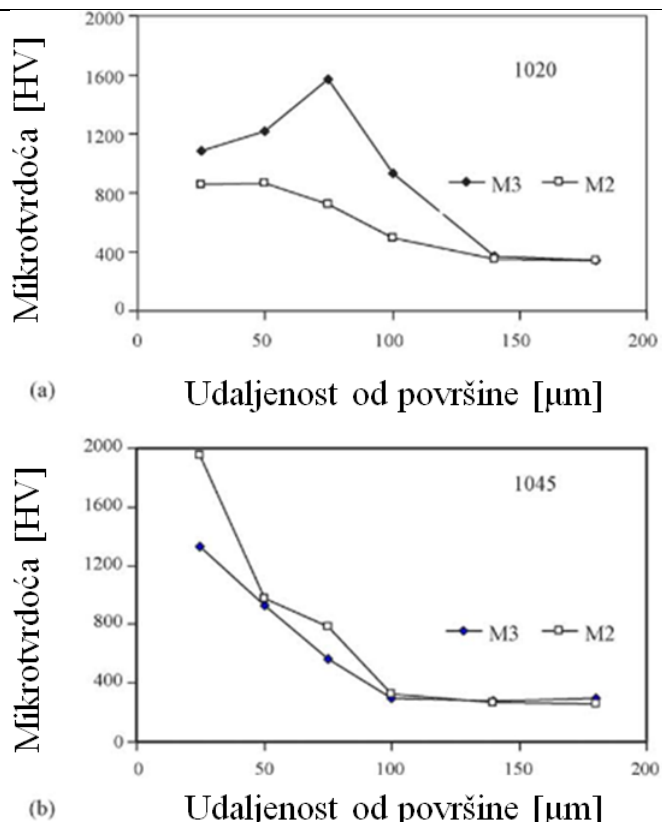
2.2.3.1. Tvrdoća i otpornost na trošenje

Utvrđeno je da je boriranje učinkovita metoda za značajno povećanje površinske tvrdoće i otpornosti na trošenje metala te da postiže bolje rezultate u odnosu na neke druge postupke toplinsko kemijskog modificiranja (prikaz u Tablica 3.).

Tablica 3. Površinske tvrdoće boriranih čelika uspoređene s drugim postupcima i tvrdim materijalima [7]

Materijal	Mikrotvrdoća (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
Pougljičeni niskolegirani čelik	650 – 950
TiC	3500
B ₄ C	5000
Dijamant	>10000

Slika 10. prikazuje ovisnost mikrotvrdoće pojedinih ugljičnih čelika u ovisnosti o udaljenosti od površine i različitim boriranim smjesama. Udjeli bora u smjesi te mikrotvrdoće čelika prije boriranja prikazani su u Tablica 4.

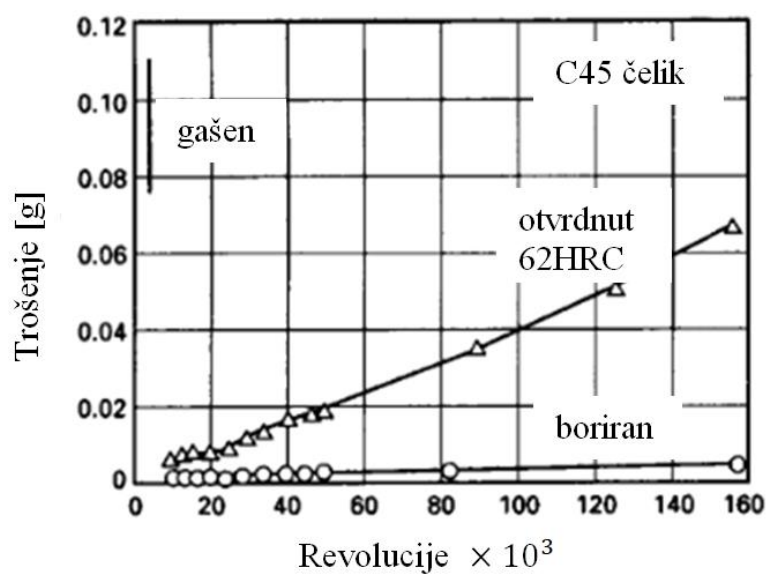


Slika 10. Profili mikrotvrdoće uzoraka boriranih na 1000°C za 4 h u mješavinama M2 i M3. [10]

Tablica 4. Mikrotvrdoće čelika C20 i C45 te sastavi mješavina bora [10]

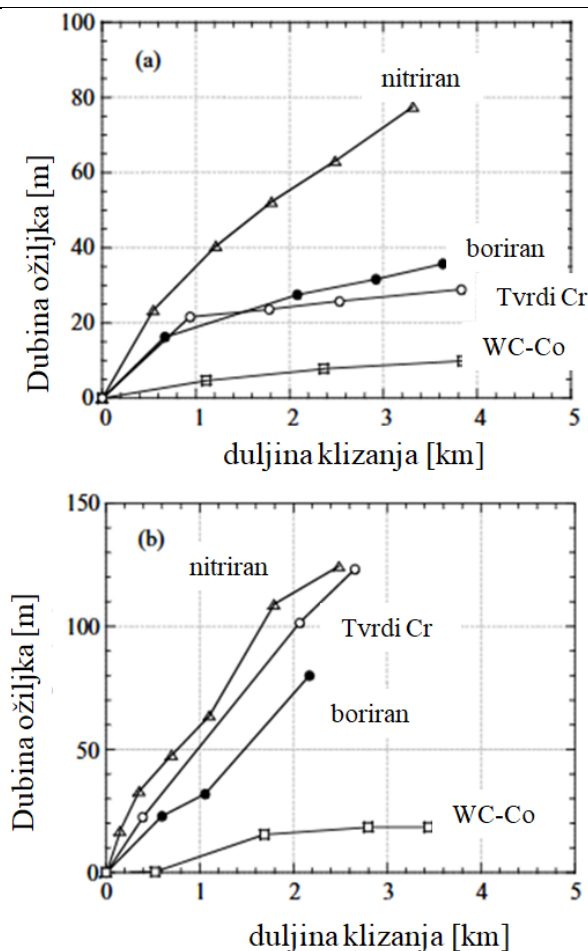
Čelik		Mikrotvrdoća HV0,1		
C20		250		
C45		260		
Sastav smjesa				
Mješavina	Borax	SiC	NH ₄ Cl	NaCl
M1	88,26	9,06	1,22	1,46
M2	73,26	24,06	1,22	1,46
M3	63,26	34,06	1,22	1,46

Zbog visoke tvrdoće i niskog faktora trenja, boridni slojevi pokazuju visoku otpornost prema glavnim mehanizmima trošenja. Slika 11. prikazuje utjecaj boriranja na otpornost na trošenje u odnosu na ugljični čelik C45 u gašenom i kaljenom stanju. [7]



Slika 11. Utjecaj boriranja na otpornost na trošenje [7]

Slika 12. prikazuje ponašanje trošenja boriranog čelika u uvjetima suhog klizanja, u usporedbi s uzorcima podvrgnutim drugim površinskim postupcima.



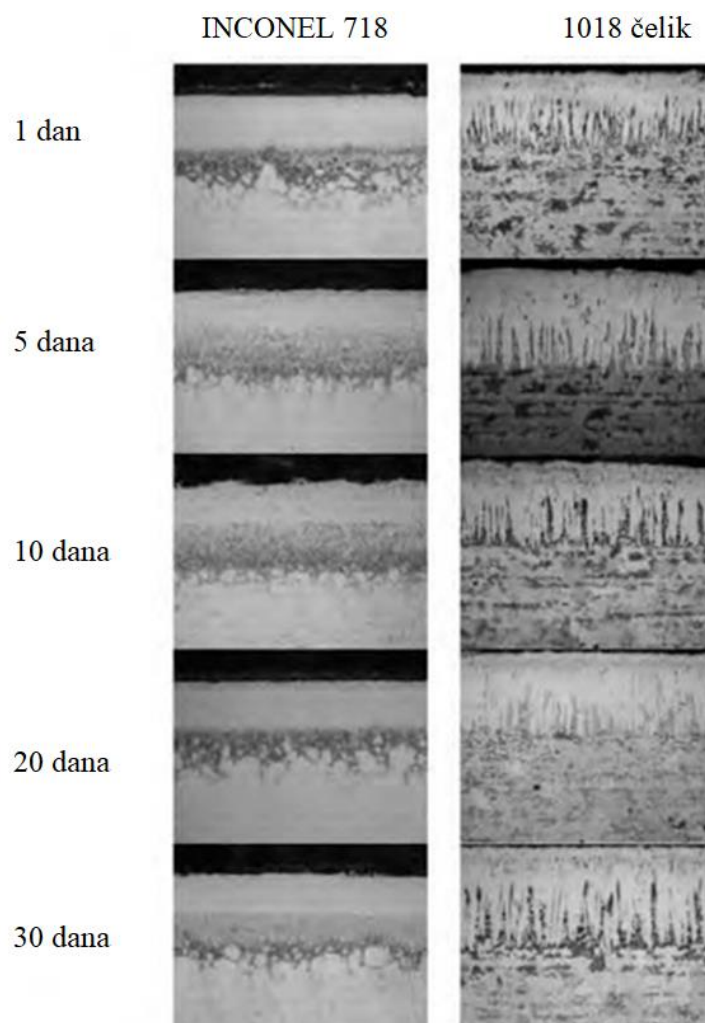
Slika 12. Krivulje trošenja boriranog čelika te čelika podvrgnutim drugim postupcima, na različitim vrijednostima primijenjenog opterećenja: (a) 5N i (b) 25N [6]

2.2.3.2. Postojanost borida prema povišenim temperaturama

Boriranje se često provodi na dijelovima strojeva za rad na povišenim temperaturama, zbog toplinske stabilnosti boridnih slojeva i njihove sposobnosti da zadrže visoku tvrdoću na povišenim temperaturama. Cementirani dijelovi nisu prikladni za rad na temperaturama iznad 200 °C jer će omekšati i izgubiti povoljna mehanička svojstva. Nitiranje se često odabire kao proces površinskog otvrdnjavanja za dijelove izložene povišenim radnim temperaturama. Međutim, nitridni slojevi također će se brzo raspasti zbog difuzije dušika iz površinskog sloja u jezgru materijala, ako se koriste na radnim temperaturama iznad 540 °C. Jedna od prednosti boriranja je ta da su boridni slojevi stabilni na visokim radnim temperaturama i mogu izdržati bez raspadanja ili gubitka tvrdoće temperature do 650 °C.

Na Slika 13. prikazana je mikrostruktura boridnih slojeva na niskougličnom čeliku AISI 1018 i superleguri Inconel 718 nakon različitih vremena izlaganja povišenoj temperaturi od

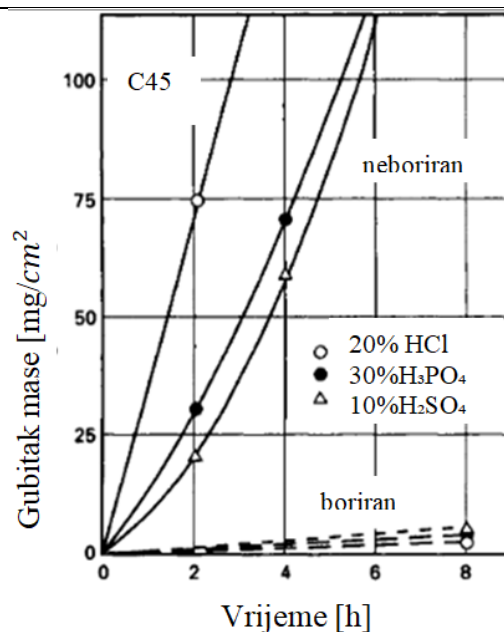
650 °C. Može se primijetiti da nije došlo do gubitka dubine boridnog sloja niti do promjene mikrostrukture niti nakon 30 dana izlaganja temperaturi .



Slika 13. Mikrostrukture boridnih slojeva izlagane visokim temperaturama kroz 30 dana [7]

2.2.3.3. Otpornost borida na djelovanje kiselina i lužina

Boriranje može znatno poboljšati otpornost na koroziju i eroziju željeznog materijala u neoksidirajućim razrijeđenim kiselinama i alkalnim medijima. Boridni slojevi u željeznim materijalima znatno poboljšavaju otpornost na koroziju napadom klorovodične, fluorovodične, fosforne i sumporne kiseline, prikazanim na Slika 14.

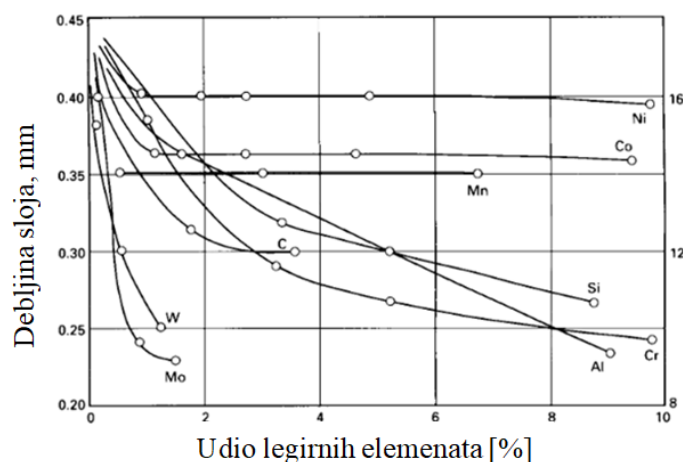


Slika 14. Korozijski utjecaj kiselina na borirani i neborirani C45 čelik [7]

2.2.3.4. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva borida

Mehanička svojstva boriranih legura uvelike ovise o sastavu i strukturi boridnih slojeva. Karakteristična nazubljena konfiguracija boridnog sloja dominantna je kod čistog željeza, nelegiranih niskougljičnih čelika i niskolegiranih čelika. Kako se povećava sadržaj legirajućih elemenata i/ili ugljika u osnovnom čeliku, razvoj nazubljenog sučelja između borida i podloge se potiskuje, a kod visoko legiranih čelika stvara se glatko sučelje.

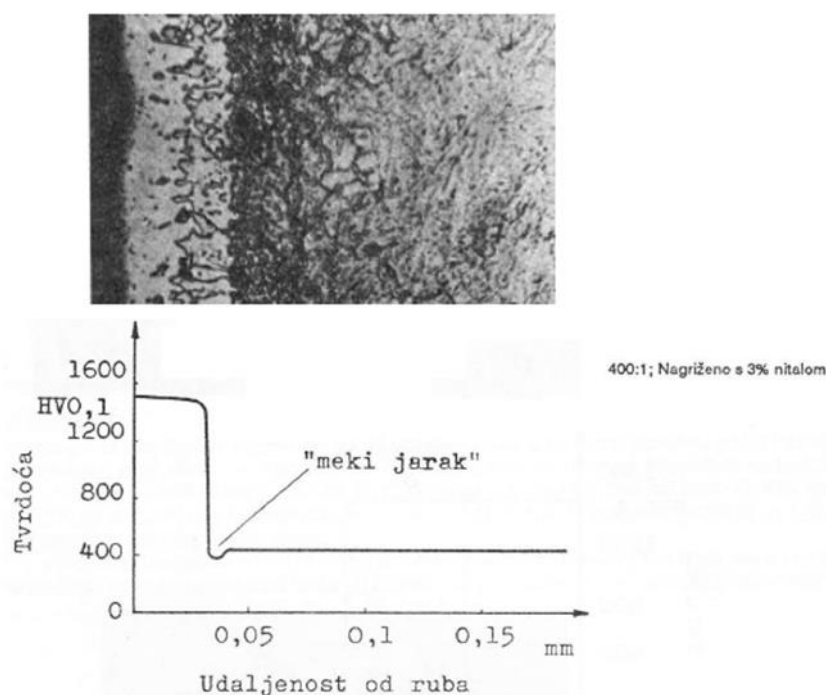
Legirni elementi uglavnom usporavaju rast boridnog sloja zbog ograničene difuzije bora u čelik, jer legirni elementi djeluju kao barijera za difuziju. Slika 15. prikazuje utjecaj legirnih dodataka u čeliku na debljinu boridnog sloja. [7]



Slika 15. Utjecaj legirnih elemenata na debljinu boridnog sloja [7]

Kod visoko legiranih čelika, legirni elementi usporavaju difuziju bora u austenitu, sprječavajući njegovu jednostavnu unutarnju difuziju. Sporija difuzija bora prema unutrašnjosti stvara veće koncentracije bora blizu površine tih visoko legiranih čelika. To objašnjava zašto se dvofazni slojevi borida, s borom bogatim FeB spojevima koji se talože na površini, opažaju nakon kraćih ciklusa boriranja s plićim ukupnim dubinama boridnog sloja u visoko legiranim čelicima u usporedbi s niskolegiranim ili običnim ugljičnim čelicima. [7]

Treba spomenuti i pojavu tzv. ugljikovog bedema. Ispod zubi boridnog sloja, zbog potiskivanja C za vrijeme difuzije B, dolazi do povećanja koncentracije C. Također treba napomenuti nepovoljan utjecaj Si i Al u čeliku na rezultate boriranja. Na čeliku koji sadrži povišen sadržaj Al ili Si ispod boridnog sloja dolazi do stvaranja „mekog jarka“ koji vrlo loše utječe na svojstva predmeta u eksploataciji (tvrđi rub na mekoj podlozi). Uvjetovan je forsiranjem stvaranja ferita od strane Si i Al. Na Slika 16. prikazana je struktura boridnog sloja s mekim jarkom na čeliku X38CrMoV5 1. [2]

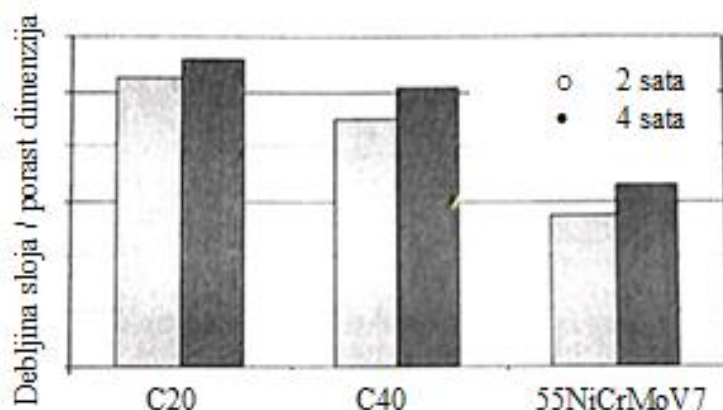


Slika 16. Mikrostruktura i raspored tvrdoće na boriranom čeliku X38CrMoV5 1 [2]

2.2.3.5. Debljina boridnog sloja

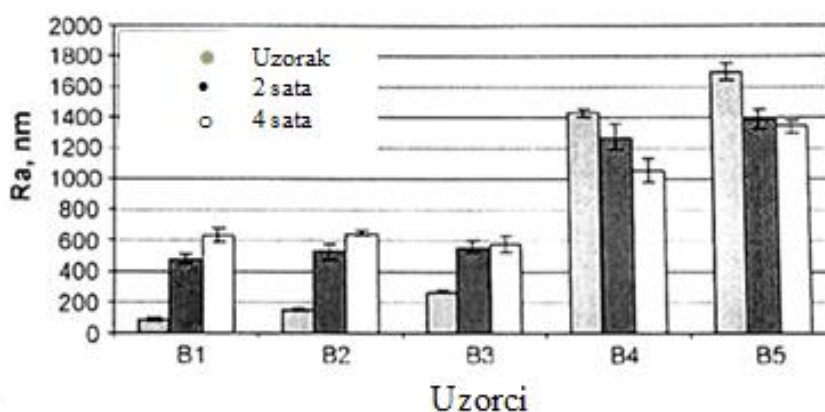
Zbog spomenutog utjecaja ugljika i legirnih elemenata na debljinu nastalog sloja, optimalna debljina boridnog sloja na nelegiranim i niskolegiranim čelicima iznosi od 50 μm do 250 μm , dok se za visokolegirane čelike preporučuje debljina sloja od 25 μm do 76 μm .

Debljina boridnog sloja utječe na dimenzije boriranih materijala. Porast dimenzija kod nelegiranih i niskolegiranih čelika iznosi $1/5$, a kod visokolegiranih i alatnih čelika $1/3$ ukupne debljine boridnog sloja. Omjer debljine i porasta dimenzija boridnog sloja za nelegirani i alatni čelik, prikazan je na Slika 17. [8]



Slika 17. Omjer debljine boridnog sloja/porasta dimenzija [8]

Osim promjena dimenzija, dolazi do značajne promjene parametra hrapavosti površine. Kod boriranja i konačne hrapavosti površine bitno je naglasiti da značajan utjecaj ima prethodna priprema površine. Za više početne vrijednosti parametara hrapavosti dolazi do smanjenja hrapavosti, a za finije pripremljene površine dolazi do pogrubljenja. Za različite pripreme površine, prikazan je porast parametra Ra na Slika 18. [8]



Slika 18. Porast parametra Ra prije i nakon postupka boriranja za različite pripreme površine [8]

2.3. Primjena boriranja

Boriranje se primjenjuje za povećanje otpornosti na trošenje i koroziju. Za određene eksploatacijske uvjete moguće je, definiranjem parametara postupka i načina boriranja, dobiti tražena svojstva. U nekim slučajevima boriranjem srednje legiranog čelika moguće je zamijeniti visokolegirani čelik. [2]

Nadalje, neke moguće primjene postupka boriranja jesu alati za [7]:

- Toplo kovanje
- Provlačenje žice
- Ekstrudiranje
- Ravnanje
- Kalupi za oblikovanje betona.

U proizvodnji nafte i plina koriste se [7]:

- Trnovi, žigovi
- Mlaznice
- Dijelovi ventila
- Cijevi.

Neki od boriranih strojnih dijelova su [7]:

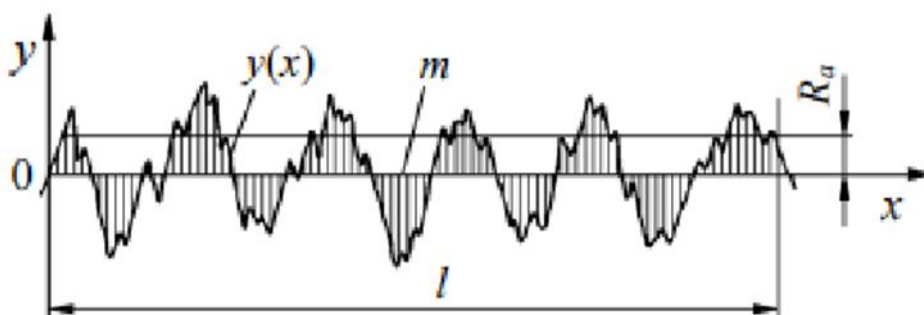
- Mlaznice
- Klipovi
- Zupčanici
- Diskovi
- Osovine.

3. KARAKTERIZACIJA SVOJSTAVA

3.1. 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. [11]

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 je jednak srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mornoj duljini l . Slika 19. prikazuje procjenu hrapavosti površine koristeći R_a , a jednačba (8) se koristi za njegov izračun. [11]



Slika 19. Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednje aritmetičko odstupanje R_a [11]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (8)$$

gdje je:

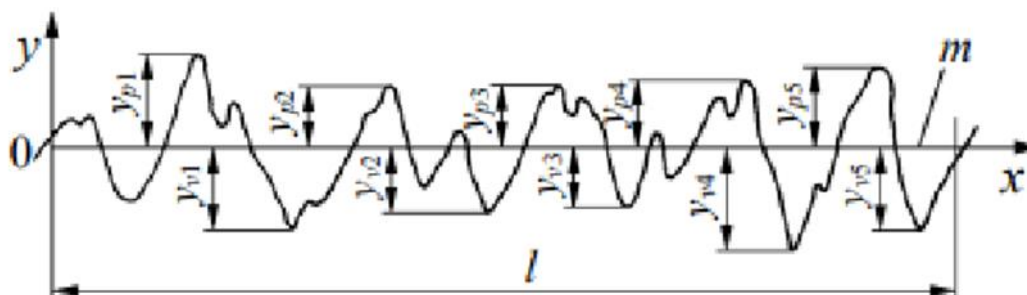
- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila, μm
- l – mjerna duljina hrapavosti površine, μm
- $y(x)$, y_i – visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu, μm
- x – dužina uzduž mjerne duljine, μm
- n – broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine.

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 (9) koristi se za izračun R_z , a na Slika 20. prikazana je procjena hrapavosti pomoću srednje visine neravnina R_z . [11]

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| + \approx 4 \times R_a \quad (9)$$

gdje je:

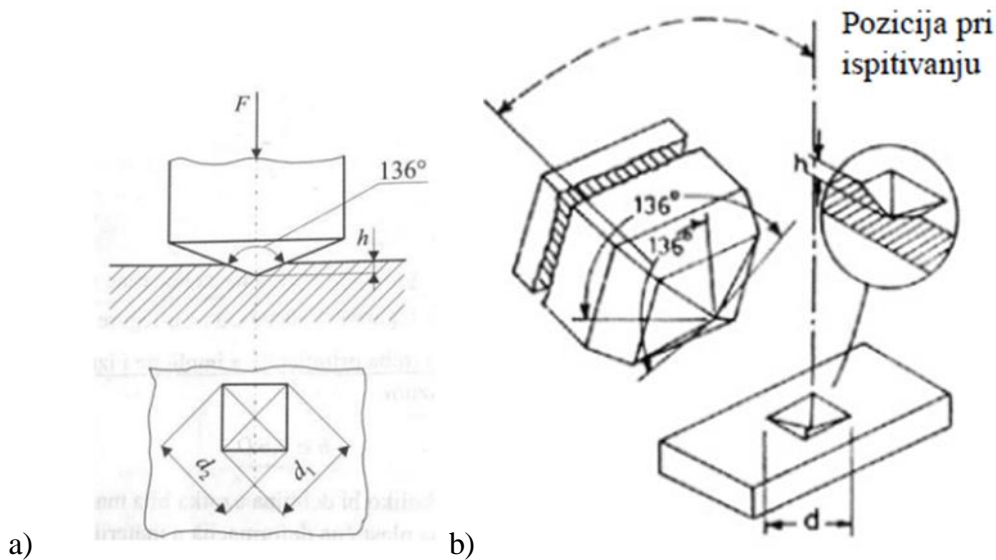
- R_z – srednja visina neravnina, μm
- y_{pi} – visina i -tog najvišeg vrha, μm
- y_{vi} – visina i -te najniže udoline, μm .



Slika 20. Procjena hrapavosti koristeći srednju visinu neravnina R_z [11]

3.2. Ispitivanje mikrotvrdoće metodom Vickers

Metoda ispitivanja po Vickersu koristi se za srednje tvrde i tvrde materijale. Penetrator je dijamantna četverostrana piramida s pravokutnom bazom vršnog kuta 136° . Prikaz metode nalazi se na Slika 21.



Slika 21. Ispitivanje tvrdoće metodom po Vickersu (HV): a) princip ispitivanja, b) položaj indentora i njegov otisak u ispitivanom materijalu [12]

Tvrdoća HV dobiva se iz omjera standardne sile F i dijagonala baze četverostrane piramide otisnute u materijalu prema jednadžbi (10) [12]:

$$HV = \frac{0,189F}{d^2} \quad (10)$$

gdje je:

- F – primijenjena sila, N
- d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide, mm.

Prednosti metode Vickers su sljedeće:

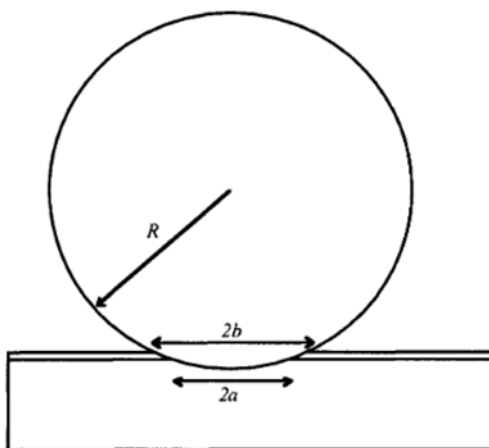
- Tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili
- Moguće je mjerenje i najtvrdijih materijala
- Moguće je mjerenje vrlo tankih uzoraka te čak tvrdoće pojedinih zrna
- Otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu

Nedostaci metode su sljedeći:

- Potrebna je brižljiva priprema površine uzorka na kojoj se obavlja mjerenje
- Za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop [12].

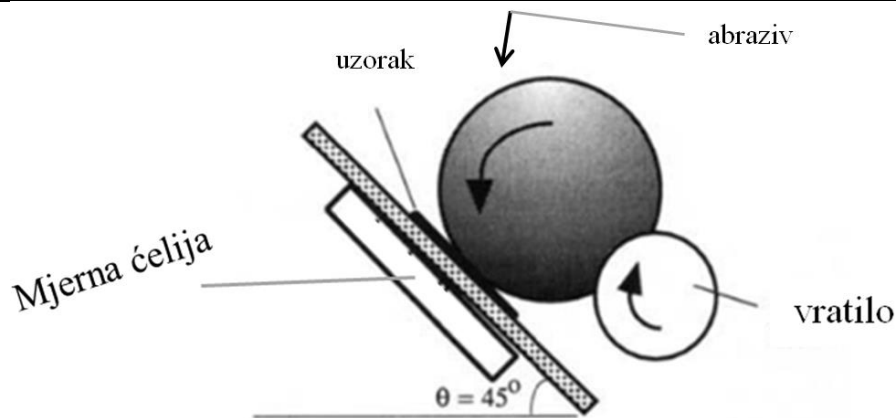
3.3. Ispitivanje otpornosti na mikroabraziju slobodno rotirajućom kuglicom

Ispitivanje otpornosti na mikroabraziju ili metoda „stvaranja udubina kuglom“ (ball-cratering) jednostavan je test abrazivnog trošenja gdje kugla (promjer 10-30 mm) rotira pod opterećenjem na površini uzorka uz prisutnost abrazivnih čestica. Metodom nastaje trag trošenja u sfernom obliku dobro definirane geometrije, omogućujući precizno određivanje trošenja optičkim mjerenjem širine traga trošenja, koji je relativno velikih dimenzija (obično od 1 do 3 mm u promjeru). Međutim, razmjeri oštećenog područja mnogo su manji nego kod konvencionalnih testova abrazivnog trošenja, obično u rasponu od 3 do 30 μm dubine. Skica mogućeg otiska prikazana je na Slika 22. [13]

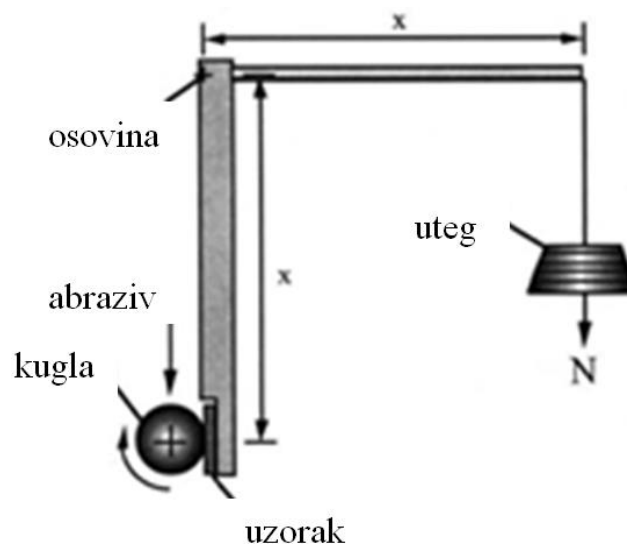


Slika 22. Karakteristične mjere kuglice i otiska kalote [13]

Kako bi test dao korisne rezultate, uvjeti ispitivanja moraju biti pažljivo kontrolirani, a podaci dobiveni iz testa analizirati se na odgovarajući način. Kuglica se može pokretati s rotirajućim pogonskim vratilom, kao na Slika 23., ili se može izravno pokretati učvršćena na vratilo, kao na Slika 24. [13]



Slika 23. Princip ispitivanja mikroabrazije slobodno rotirajućom kuglicom. Opterećenje trošene površine određeno je težinom kuglice [13]



Slika 24. Princip ispitivanja mikroabrazije kuglicom učvršćenom na vratilo. Opterećenje trošene površine određeno je polugom i utegom [13]

Osim dobre kontrole položaja i brzine rotacije kuglice, još jedan zahtjev testa je poznavanje i kontrola sile koja djeluje između kugle i površine. Kod uređaja prikazanog na slici 23., opterećenje je određeno težinom kugle, no budući da je normalna komponenta sile između kugle i uzorka djelomično pod utjecajem trenja unutar sustava, nužno je ugraditi mjernu čeliju za točno mjerenje normalne sile tijekom testa. Koncentracija i sastav abrazivne smjese važan su čimbenik koji, zajedno s učincima primijenjenog opterećenja i brzine klizanja, utječu ne samo na brzinu trošenja, već i na obrazac kretanja čestica unutar područja kontakta, a time i na mehanizme uklanjanja materijala. [13]

Izraz volumena V sfernog otiska pokazanog na Slika 22., računa se prema izrazu [13]:

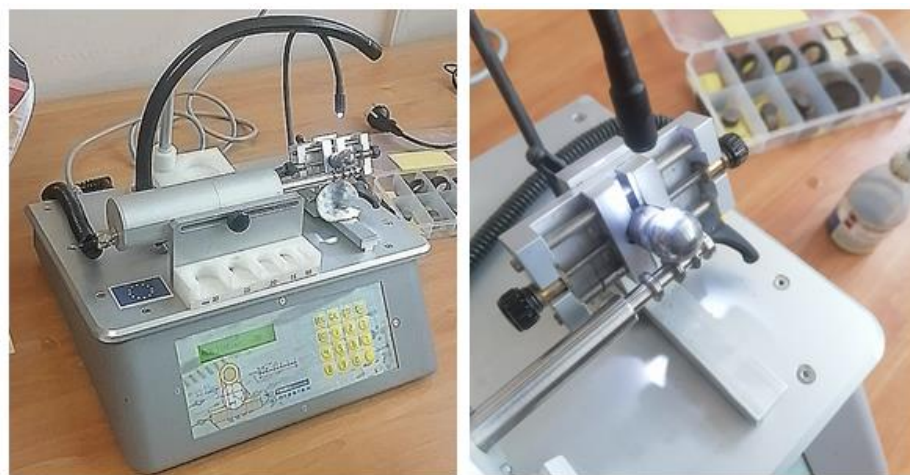
$$V \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad (11)$$

gdje je:

- V - volumen sfernog otiska, mm^3
- b - polumjer sfernog otiska, mm
- R - polumjer kugle, mm.

Ispitivanje otpornosti na mikroabraziju često se koristi za proučavanje tankih tvrdih prevlaka i tvrdih površinskih slojeva filmova. Metoda je također prikladna za proučavanje abrazije rijetkih praškastih materijala poput plemenitih metala, za koje bi makroskopsko ispitivanje trošenja bilo preskupo. [13]

U radu je korišten Kalotester sa slobodno rotirajućom kuglicom prema skici na Slika 23., također prikazan na Slika 25. Kuglica izrađena od čelika 100Cr6 i promjera 20 mm, rotira brzinom od 300 okretaja u minuti. Na kuglicu se nanosi abraziv. Uzorak je položen na podlogu pod kutem $\varphi = 60^\circ$. Uzorci se prije i poslije ispitivanja ručno čiste blaznicom natopljenom 95 postotnim alkoholom.



Slika 25. Kalotester Tribotechnic sa slobodno rotirajućom kuglicom

4. PLAN I PRIPREMA POKUSA

Za provedbu ispitivanja, korišteni su uzorci od čelika C45, srednje - ugljičnog čelika čiji je postotak ugljika između 0,42 i 0,50 % u ukupnoj težini čelika. Ovi čelici se koriste u raznim primjenama, a posebno su pogodni za dijelove koji zahtijevaju visoku otpornost na trošenje te čvrstoću. Kemijski sastav C45 čelika prikazan je u Tablica 5. [14]

Tablica 5. Kemijski sastav boriranog čelika C45 [14]

KEMIJSKI SASTAV								
C	Cr	Ni	Mn	Si	V	Mo	P	S
0,46	0,4	0,4	0,65	0,4	0,4	0,1	0,03	0,03

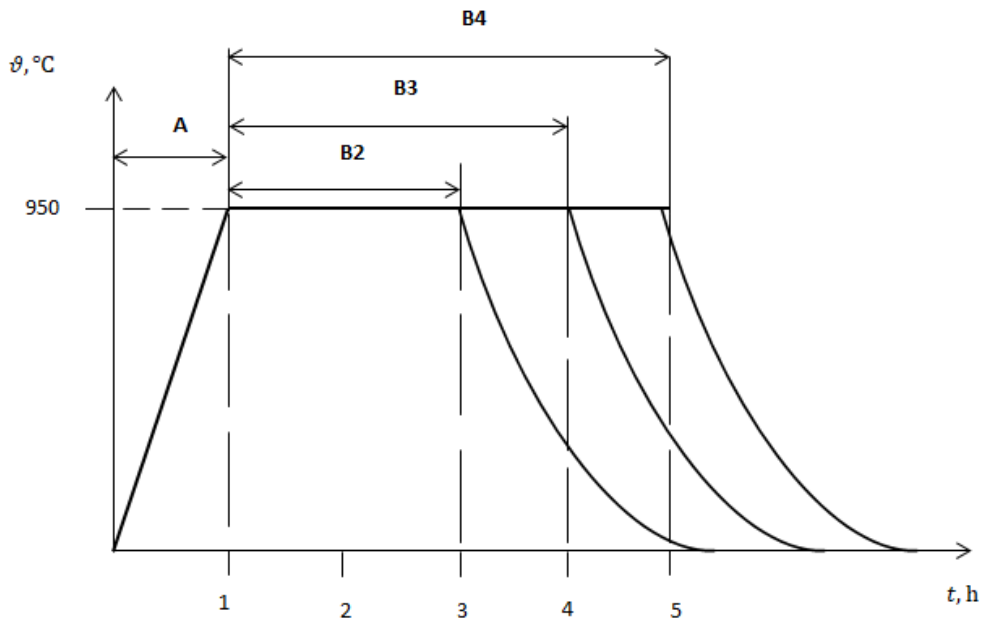
Dimenzije početnih uzoraka su $\varnothing 16 \times 11$ mm. Uzorci su prethodno odrezani iz šipke promjera $\varnothing 18$ te fino tokareni. Nakon toga, ručno su brušene odrezane stranice s brusnim papirom granulacije P150, P400, P800 i P1200.

4.1. Boriranje

Boriranje je provedeno u peći na temperaturi od 950°C u trajanju od 2, 3 i 4 sata. Nakon boriranja uzorci su zajedno s retortom i praškom sporo hlađeni u peći.

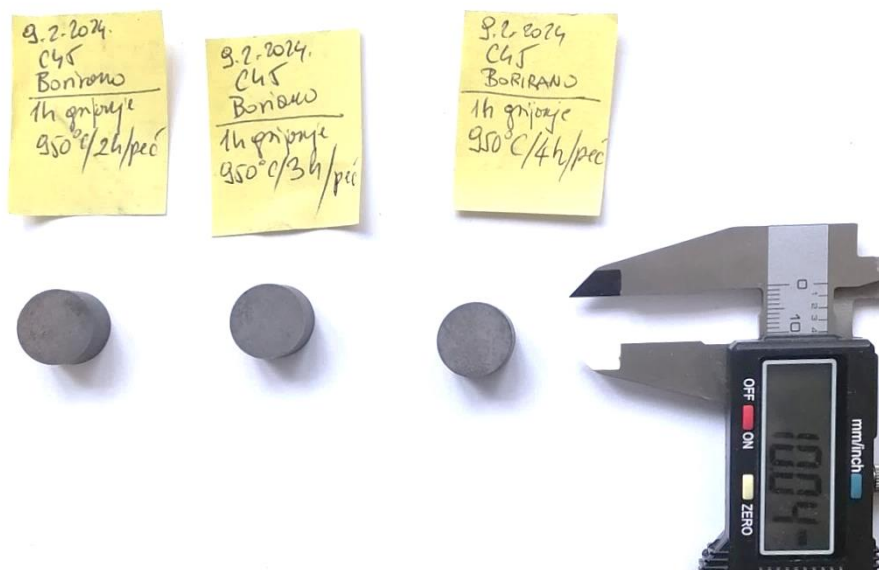
Za boriranje korišten je prašak DURBORID G. U metalnu posudu volumena od 1 litre (retortu), postavljeni su uzorci te okruženi praškom.

Slika 26. prikazuje dijagram provođenja postupka boriranja. Oznakom „A“ označeno je ugrijavanje uzoraka u trajanju od 1 sata, a oznakom „B“ boriranje u trajanju od 2, 3 i 4 sata.



Slika 26. Dijagram postupka boriranja

Slika 27. prikazuje tri borirana uzorka s različitim vremenima boriranja.



Slika 27. Borirani uzorci

4.2. Priprema otopine

U svrhu provedbe ispitivanja boriranog sloja na tribokoroziju, mikroabrazijski trošeni uzorci izlagani su 3,5 %-tnoj otopini NaCl u vodi. Za pripremu otopine izmjereno je 96,5 mL

destilirane vode i 3,5 g NaCl kako bi se dobio traženi sastav. Trajanje ispitivanja korozije u otopini trajalo je 24 sata.

Nadalje, radi lakšeg praćenja ispitivanja te prikaza rezultata, u Tablica 6. sukladno su označeni početni borirani i neborirani uzorci te uzorci prije i poslije izlaganja vodenoj otopini NaCl.

Tablica 6. Oznake polaznih i boriranih uzoraka C45 čelika

Početna oznaka	Proces			
B0	Polazno stanje	Oznaka prije i nakon izlaganja	Mikroabrazija	Mikroabrazija+korozija
B2	Borirano: 1 h grijanje + 950°C/2h/Durborid G/ peć		2A	2B
B3	Borirano: 1 h grijanje + 950°C/3h/Durborid G/ peć		3A	3B
B4	Borirano: 1 h grijanje + 950°C/4h/Durborid G/ peć		4A	4B

5. REZULTATI ISPITIVANJA

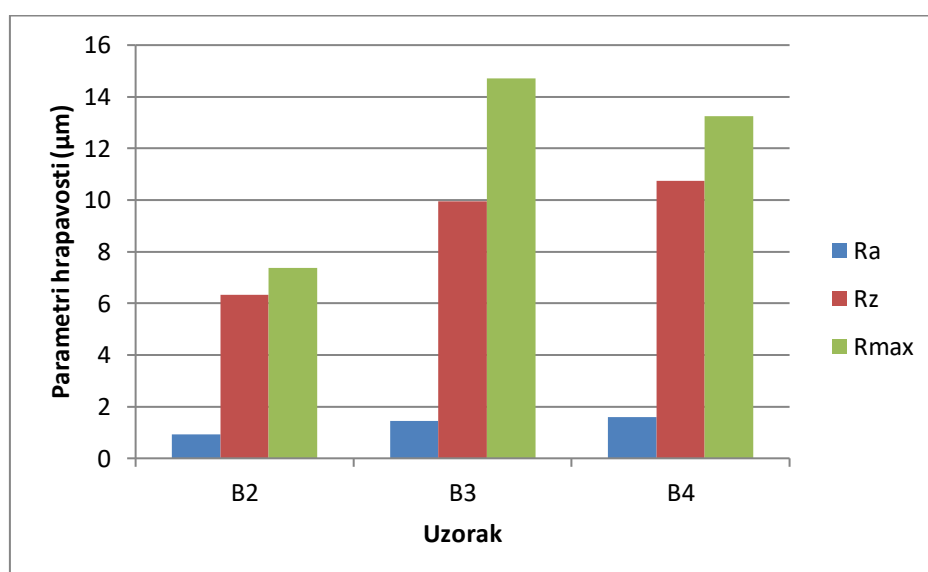
5.1. Hrapavost površine

Ispitivanje hrapavosti površine boriranih uzoraka provedeno je pomoću uređaja TIME 3202, s uzorkom položenim na postolje TIME A202, prikazanima na Slika 28.



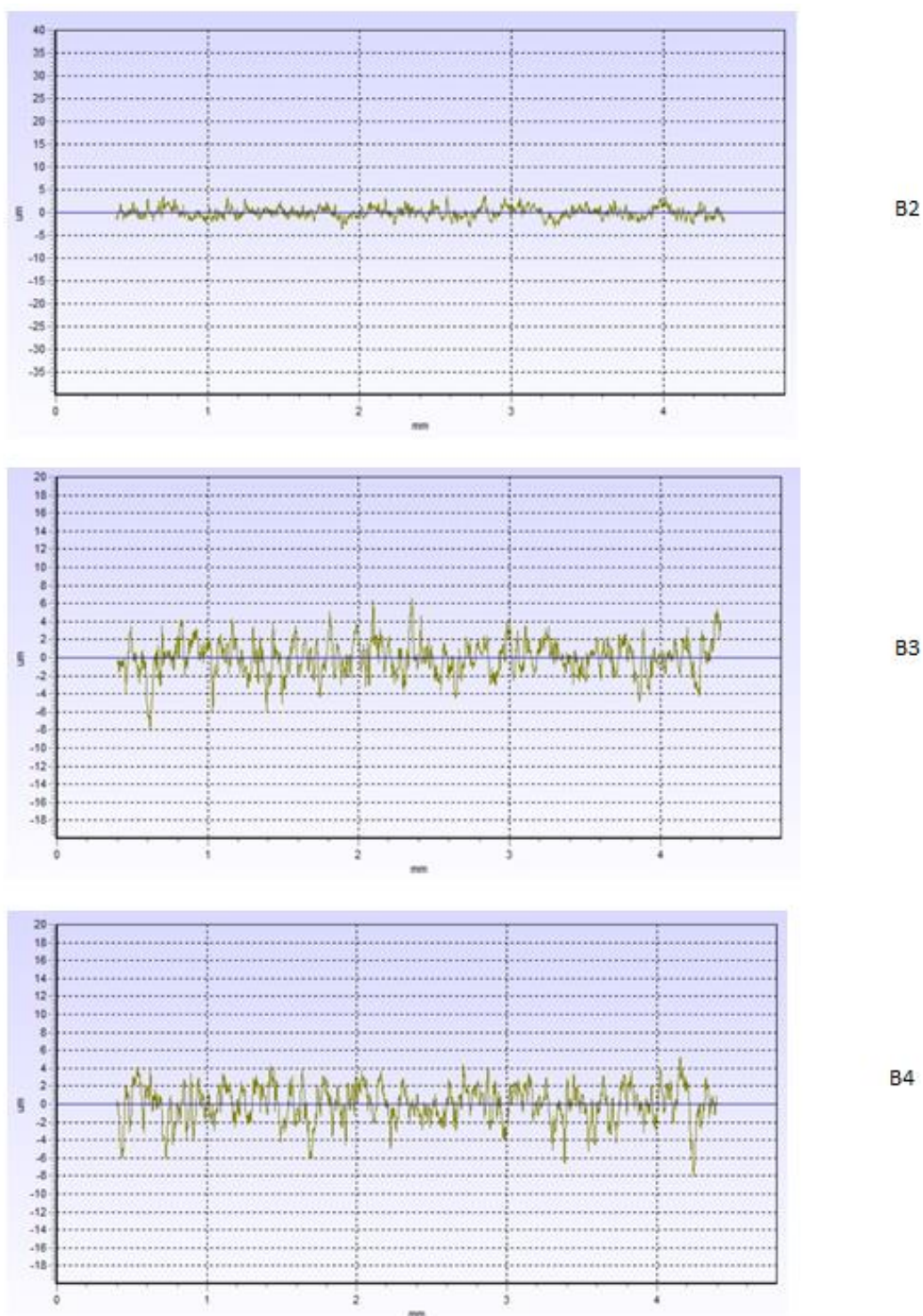
Slika 28. Uređaj (TIME 3202) i postolje (TIME A202) za ispitivanje hrapavosti površine

Dijagram na Slika 29. prikazuje vrijednosti parametara hrapavosti R_a , R_z i R_{max} . Numeričke vrijednosti dane su u tablici u prilogu.



Slika 29. Usporedba vrijednosti parametara hrapavosti boriranih uzoraka

Iz rezultata s dijagrama vidljivo je da postupak boriranja malo utječe na hrapavost površine. Uzorak boriran 2 sata pokazuje niže vrijednosti parametara hrapavosti nego uzorci borirani 3 i 4 sata. Razlika je prikazana i profilima hrapavosti na Slika 30., dobivenima uz pomoć prijenosnog računala.

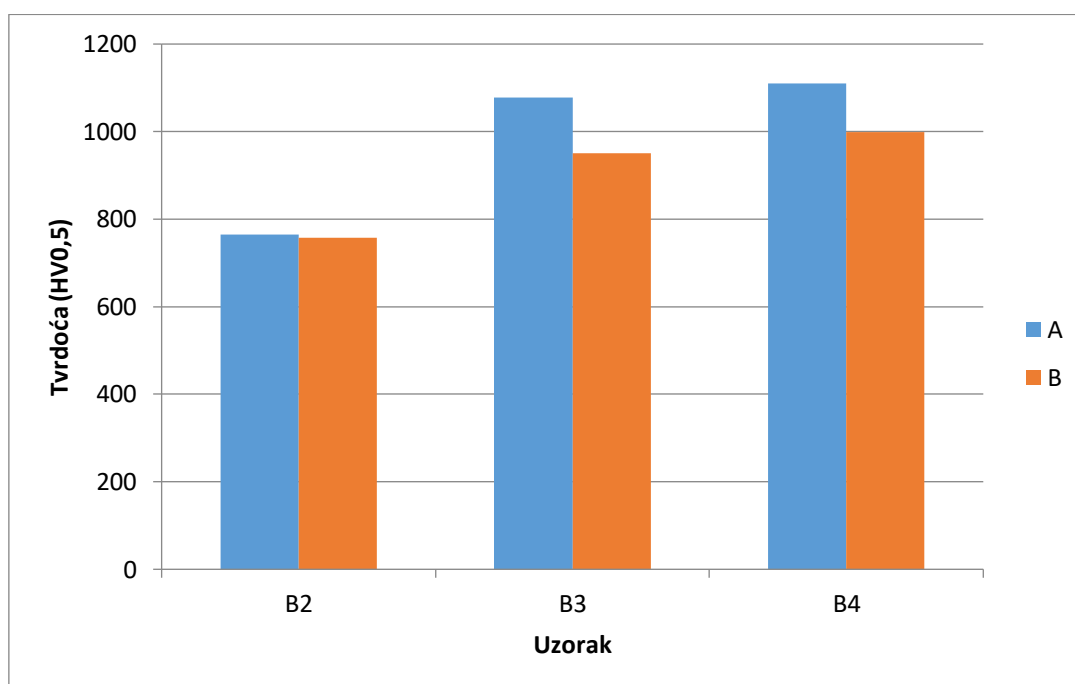


Slika 30. Profili hrapavosti boriranih uzoraka

5.2. Tvrdoća

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickers metodom HV0,5 na uređaju Leitz Durimet pod opterećenjem od 5N sukladno postupku objašnjenom u poglavlju 3. Ispitivanje je provedeno pet puta za svaki uzorak prije i nakon izlaganja 3,5%-tnoj otopini NaCl u vodi.

Dijagram na Slika 31. prikazuje usporedbu srednjih vrijednosti izmjerene tvrdoće boriranih uzoraka. Oznaka „A“ predstavlja uzorke prije izlaganja, a oznaka „B“ predstavlja uzorke nakon izlaganja otopini. Sve vrijednosti ispitivanja tvrdoće dane su u tablici u prilogu.



Slika 31. Tvrdoća površine boriranih uzoraka prije i nakon izlaganja 3,5% -tnoj otopini NaCl u vodi

Iz dijagrama srednjih vrijednosti tvrdoće na površini primjetno je kako se dužim vremenom boriranja značajno povećava tvrdoća. U usporedbi s neboriranim C45 čelikom koji ima tvrdoću oko 200 HV, primjetno je da tvrdoća boriranog C45 čelika raste 5 – 6 puta. Histogram također pokazuje da nakon izlaganja uzoraka koroziji dolazi do vidljivog pada tvrdoće.

5.3. Trošenje mikroabrazijom

Ispitivanje otpornosti boridnog sloja na mikroabrazijsko trošenje provedeno je na kalotesteru Tribotechnic postupkom opisanim u poglavlju 3. Kuglica promjera 20 mm imala je vrtnju od 300 okretaja u minuti. Uzorci su postavljeni pod nagibom od 60° u odnosu na horizontalnu ravninu. Za ispitivanje uzoraka korištena je abrazivna suspenzija Struers DP 3 s dijamantnim zrcima veličine 3 μm prikazana na Slika 32. Jedna kap abrazivne smjese kapala je na kuglicu svakih 10 sekundi. Vrijeme ispitivanja uzoraka redom je bilo 120, 180 i 240 sekundi.



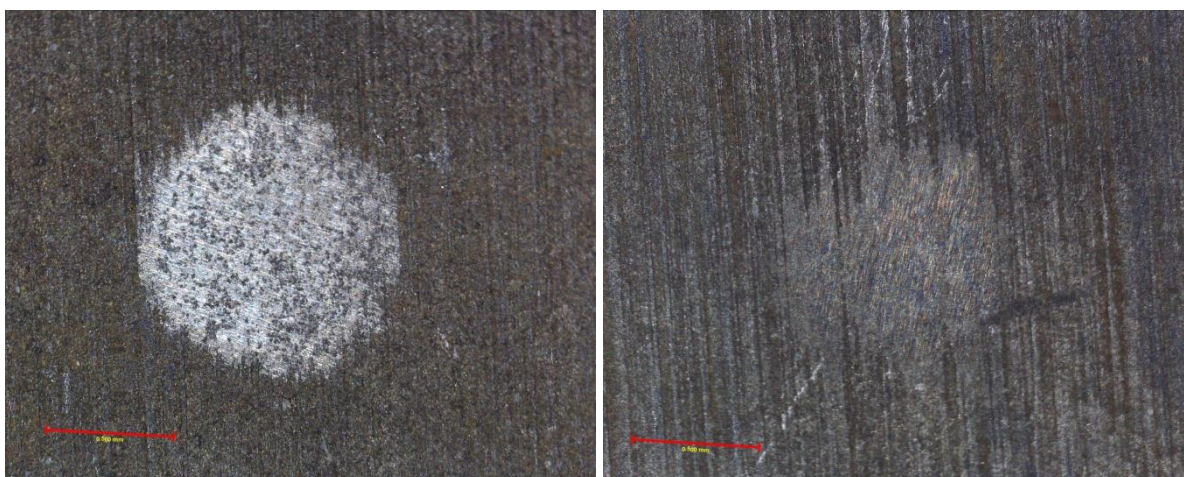
Slika 32. Abrazivna suspenzija Struers DP 3

Slika 33., Slika 34. i Slika 35. prikazuju nastale kalote prilikom mikroabrazijskog trošenja uzoraka boriranih 2, 3 i 4 sata prije (oznaka A) i poslije (oznaka B) držanja u otopini. Kalote su redom prikazane prema dolje u odnosu na vrijeme ispitivanja.

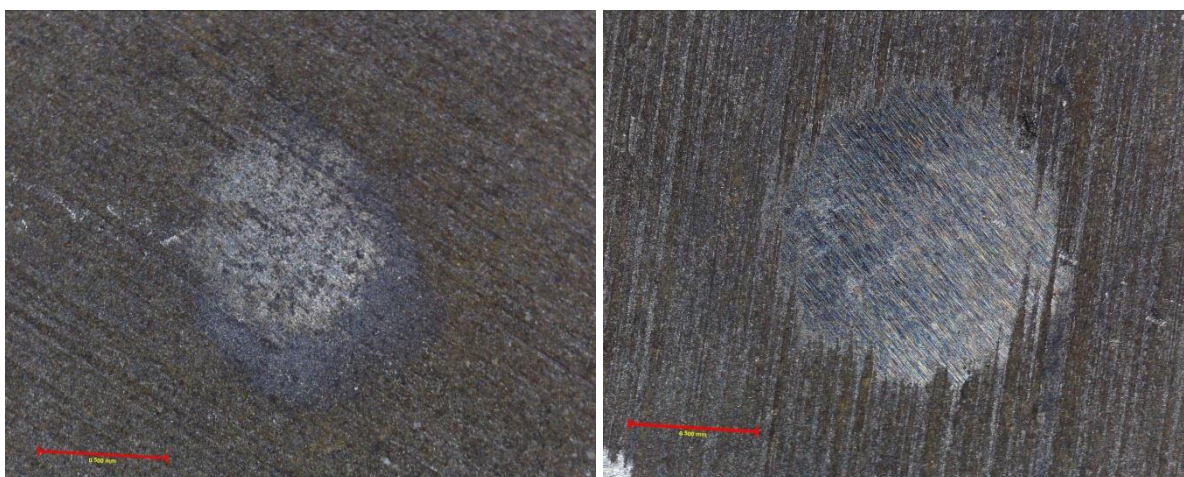
2A

120 s

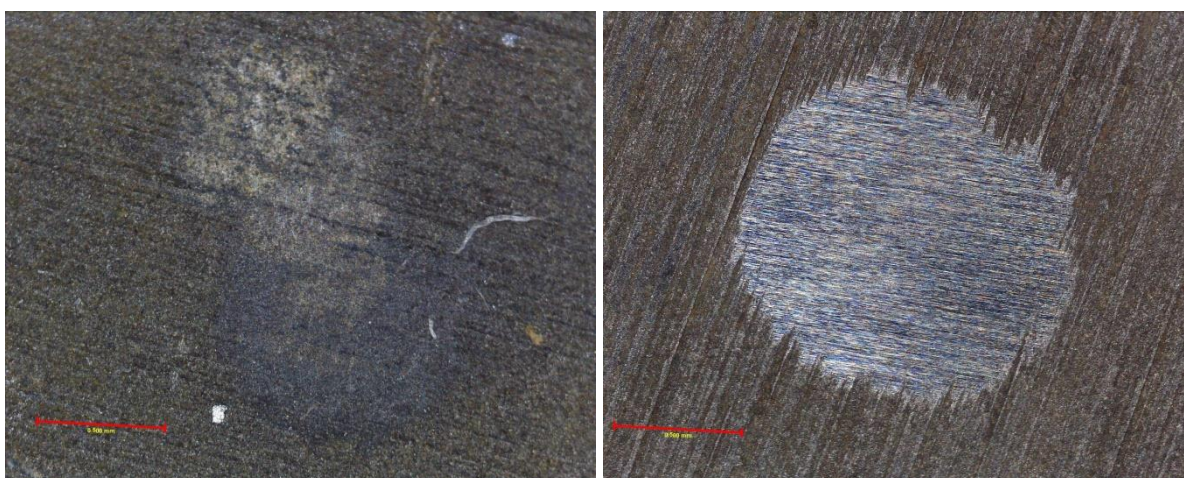
2B



180 s



240 s

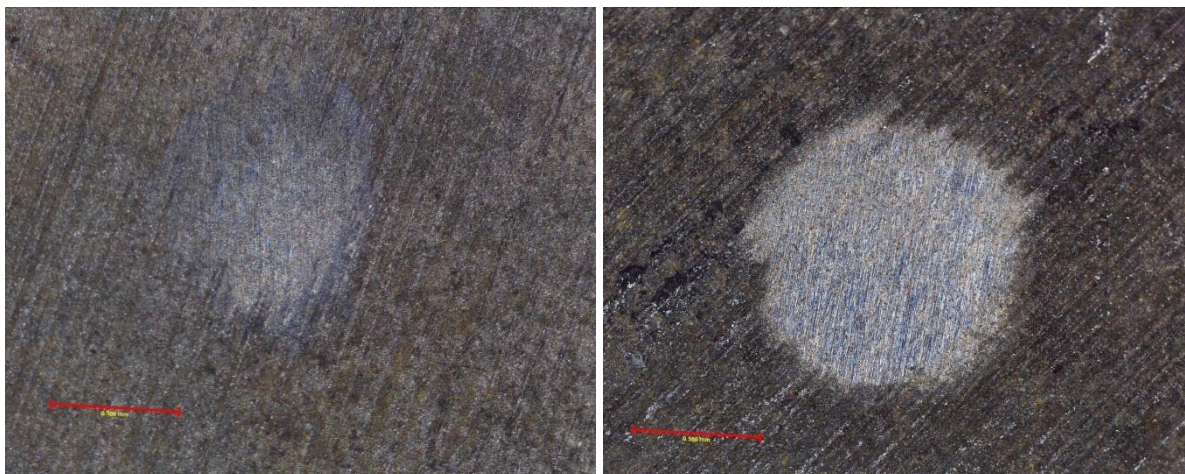


Slika 33. Kalote na uzorku boriranom 2 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji

3A

120 s

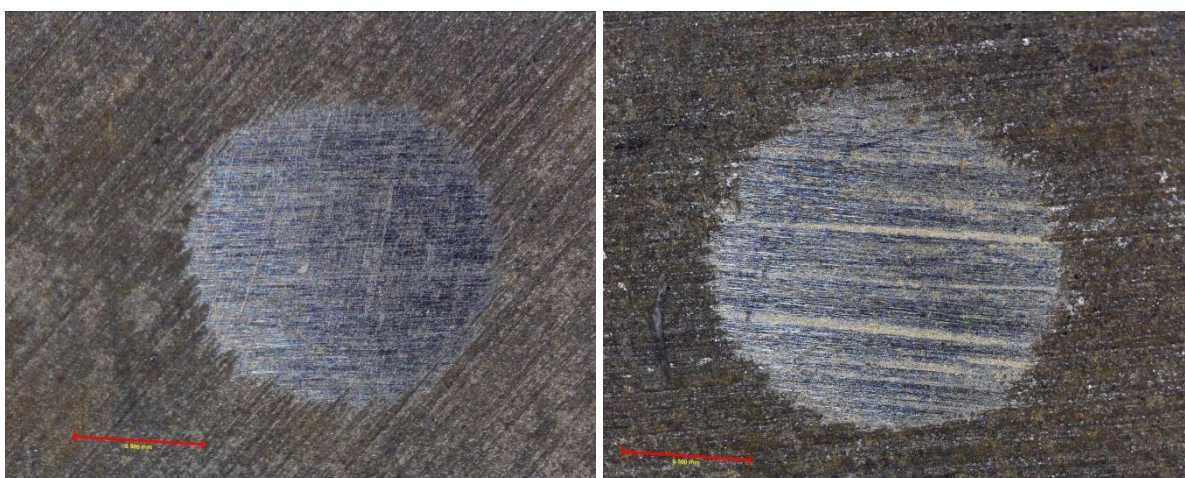
3B



180 s



240 s

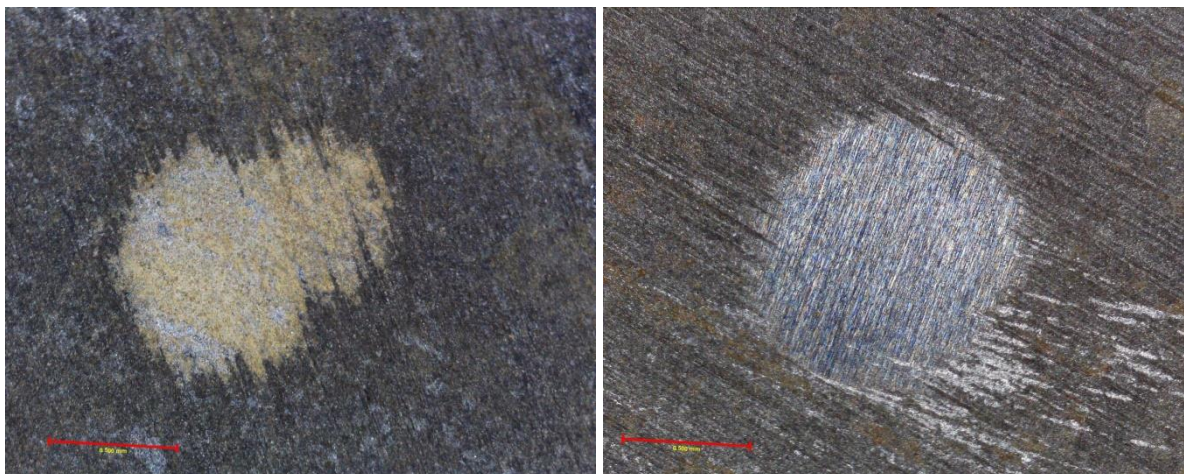


Slika 34. Kalote na uzorku boriranom 3 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji

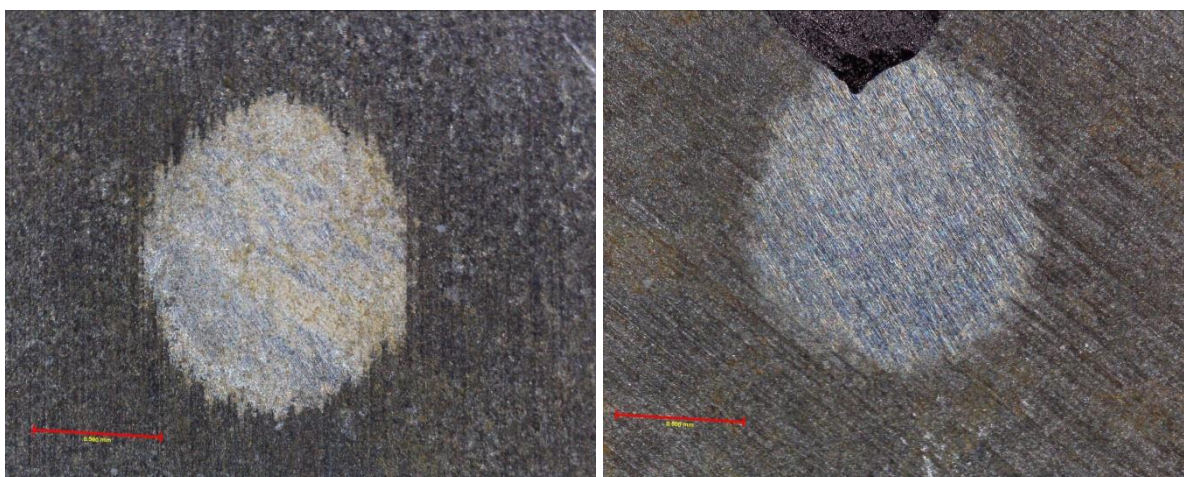
4A

120 s

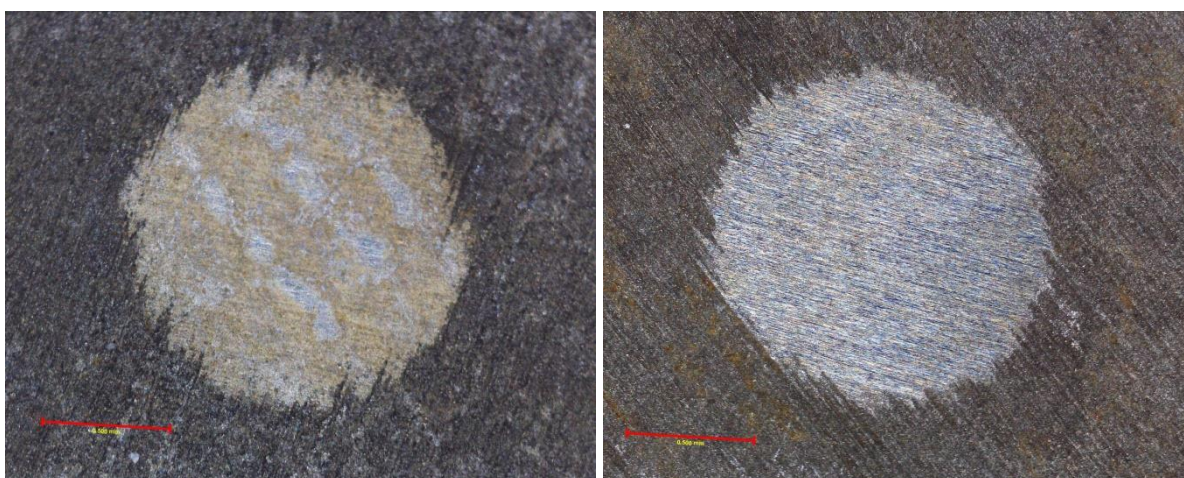
4B



180 s

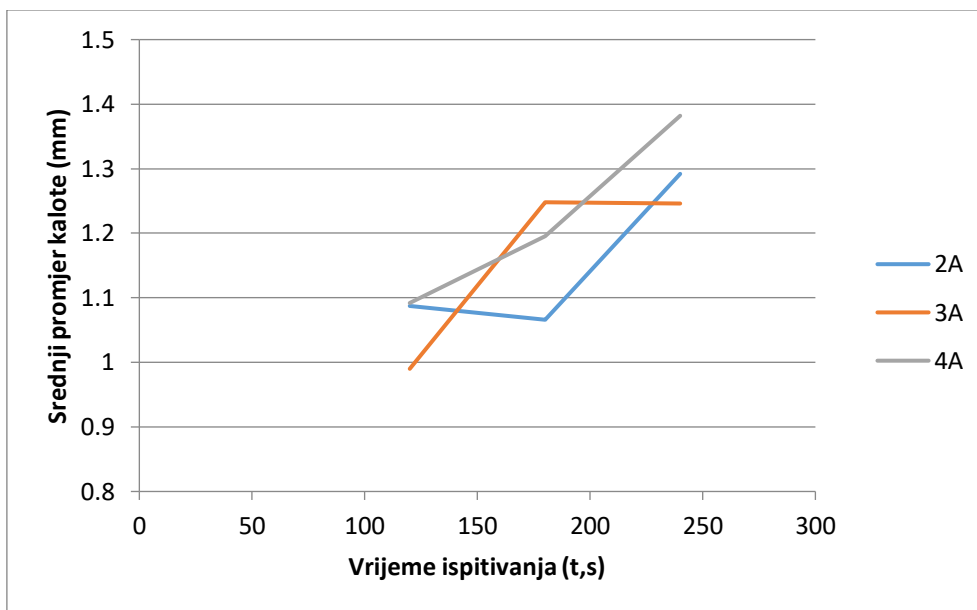


240 s

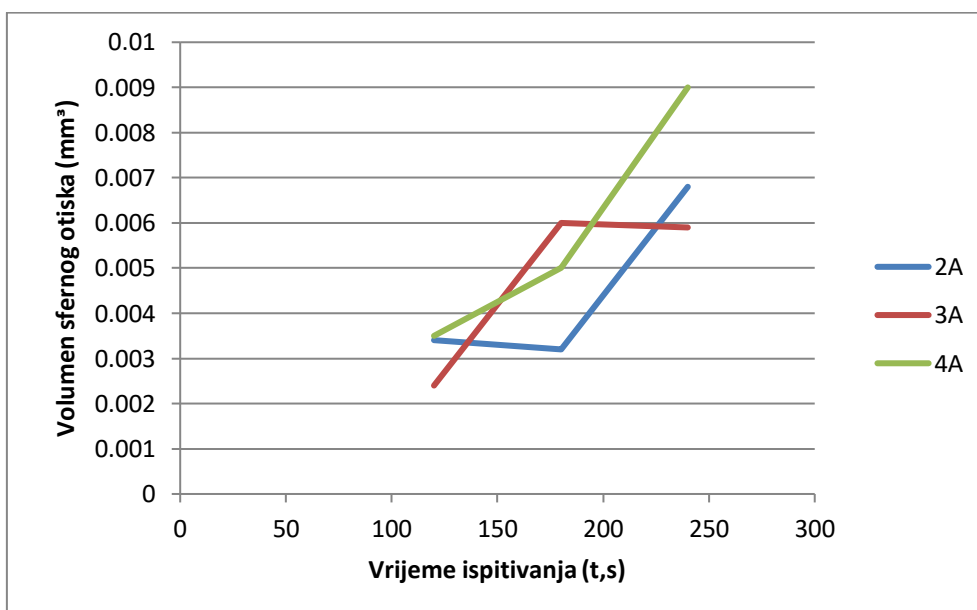


Slika 35. Kalote na uzorku boriranom 4 h prije (lijevo) i poslije (desno) izlaganja koroziji

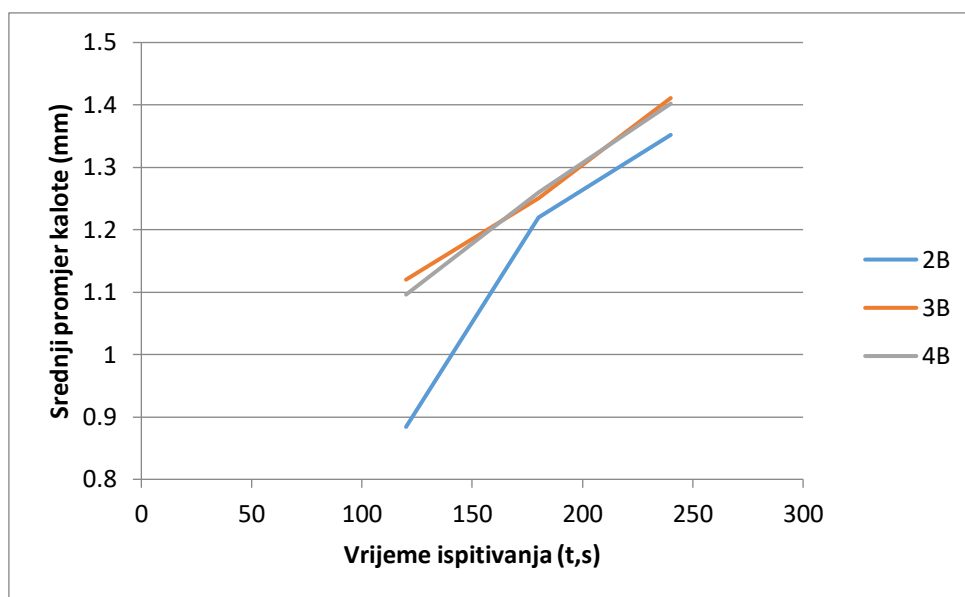
Za svaku kalotu, na mikroskopu su uzeta po tri promjera kako bi se dobila neka srednja vrijednost te mogli usporediti promjeri kalote i volumeni trošenja pojedinog uzorka. Slika 36. i Slika 37. prikazuju ovisnost promjera kalote i volumena trošenja o vremenu ispitivanja uzoraka prije izlaganja otopini dok Slika 38. i 39. prikazuju isto, ali nakon izlaganja. Potpuni podaci dani su u tablici u prilogu. Volumen sfernog otiska izračunat je pomoću formule prikazane u poglavlju 3.



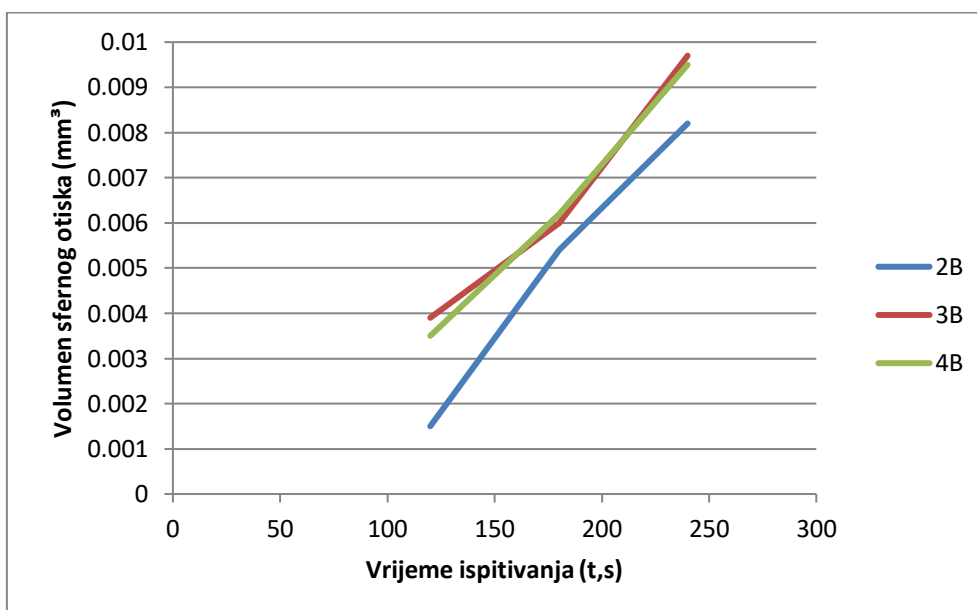
Slika 36. Ovisnost promjera kalote o vremenu ispitivanja uzoraka prije izlaganja otopini



Slika 37. Ovisnost volumena otiska o vremenu ispitivanja uzoraka prije izlaganja otopini



Slika 38. Ovisnost promjera kalote o vremenu ispitivanja uzoraka poslije izlaganja otopini



Slika 39. Ovisnost volumena otiska o vremenu ispitivanja uzoraka poslije izlaganja otopini

Iz dijagrama trošenja prije korozije vidljivo je da trošenje svih uzoraka s vremenom ispitivanja raste. Uzorak 2A ima nešto manji porast trošenja s vremenom, dok uzorak 4A pokazuje najveće trošenje. Povećano trošenje uzorka 3A, te posebno uzorka 4A, moglo bi biti posljedica stvaranja krhkog FeB, odnosno pojave mikropukotina u boridnom sloju između dviju faza.

Iz dijagrama trošenja nakon korozije vidljivo je kako uzorak 2B ima manje trošenje od uzoraka 3B i 4B. Povećano trošenje uzoraka nakon izlaganja otopini posljedica je pojave korozije na uzorcima.

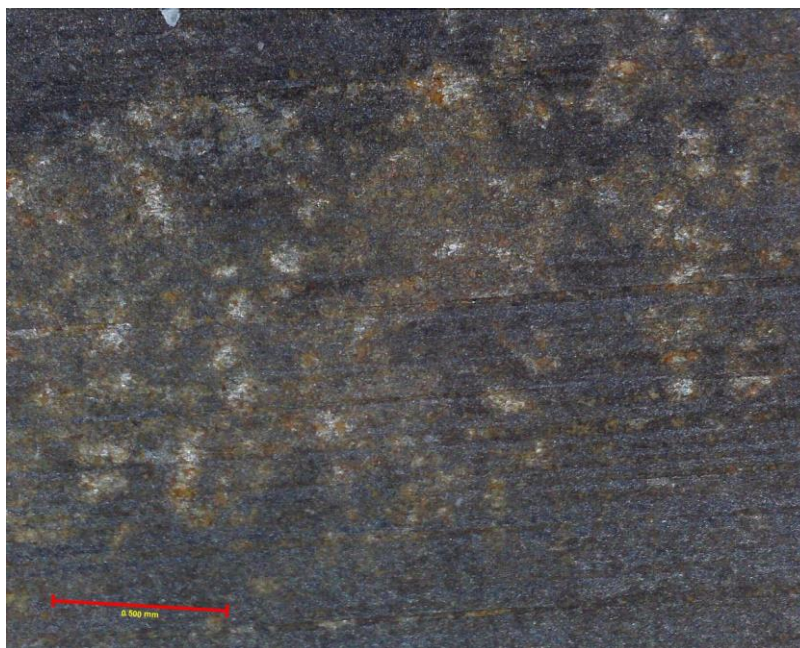
Linearnom regresijskom analizom ovisnosti promjera kalota o vremenu ispitivanja u računalnom programu Excel, određeni su nagibi regresijskih pravaca koji predstavljaju brzine trošenja uzoraka tijekom ispitivanja. Usporedba brzina trošenja prije i nakon korozije prikazana je u Tablica 7.

Tablica 7. Brzine trošenja uzoraka

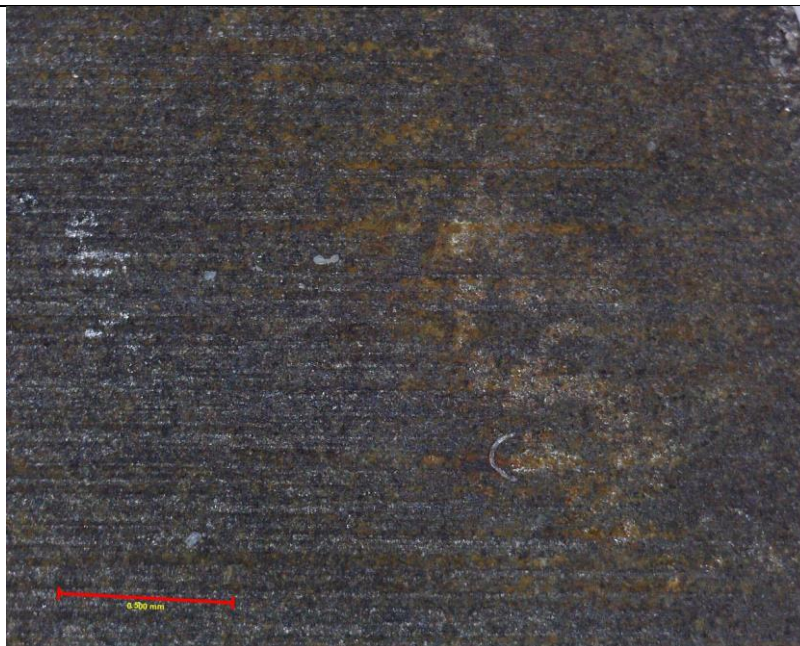
Uzorak	2A	3A	4A	2B	3B	4B
Brzina trošenja (mm/s)	0,0017	0,0021	0,0024	0,0039	0,0024	0,0025

5.4. Izgled borirane površine nakon korozije

Borirani uzorci bili su utopljeni u posudice s vodenom otopinom 3,5% NaCl. Posuda s uzorkom boriranom 2 h imala je veći talog od uzorka, odnosno pokazala je najveću promjenu boje. Izgled borirane površine pod mikroskopom prikazan je na slikama Slika 40., Slika 41. i Slika 42.



Slika 40. Korodirana površina uzorka boriranog 2 h



Slika 41. Korodirana površina uzorka boriranog 3 h



Slika 42. Korodirana površina uzorka boriranog 4 h

Iz izgleda korodiranih površina zaključuje se da su nastali korozijski produkti na svim ispitnim uzorcima. Korodirana površina u odnosu na ukupnu snimljenu površinu uzorka prikazanu na gornjim slikama smanjuje s duljim trajanjem boriranja. Objašnjenje ove pojave nalazi se u činjenici da duljim trajanjem boriranja nastaje deblji boridni sloj koji je otporniji na elektrokemijsku koroziju.

6. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno ispitivanje uzoraka čelika C45, boriranih pri 950°C u trajanju od 2, 3 i 4 sata kako bi se mogao dati zaključak o utjecaju parametara boriranja konstrukcijskih čelika na hrapavost, tvrdoću te otpornost na mikroabrazijsko trošenje i koroziju.

Na temelju provedenih ispitivanja navedenih u radu zaključuje se da boriranje općenito povećava hrapavost i tvrdoću površine te da se duljim vremenom boriranja dodatno povisuju vrijednosti ovih svojstava.

Nadalje, ispitivanje otpornosti na mikroabraziju pokazalo je da prije i nakon izlaganja 3,5%-tnoj otopini NaCl u vodi, uzorak boriran 2 sata ima manje trošenje nego uzorci borirani 3 sata i 4 sata. Ovaj rezultat može se objasniti pojavom krhkog sloja FeB pri dužem vremenu boriranja, što se predlaže istražiti daljnjom metalografskom analizom borirane površine.

Iz ispitivanja uzoraka na koroziju može se zaključiti da će se nakon 24-satnog izlaganja korozivnoj otopini 3,5 %Na Cl u vodi dodatno smanjiti tvrdoća i otpornost na mikroabrazijsko trošenje uzoraka. Na svim boriranim uzorcima uočena je pojava korozijskih produkta, pri čemu su oni najviše izraženi na uzorcima boriranim 2 sata, a najslabije na uzorcima boriranim 4 h.

LITERATURA

- [1] Grilec, K.; Predavanja iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, dio Tribologija, FSB, Zagreb, 2023/2024.
- [2] Landek, D., Matijević B.; Predavanja i vježbe iz kolegija “Toplinska obrada“, FSB, Zagreb, 2023/2024.
- [3] Trautmann, F.; Boriding with Durferit DURBORID Products, 2006.
- [4] Milinović A., Krumes D., Marković R.; An investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels, Tehnički vjesnik, 19 (27-31), Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod., 2012.
- [5] Campos-Silva I. E., Rodríguez-Castro G. A.; Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels, Chapter 18, Instituto Politécnico Nacional, Mexico City, México, 2015.
- [6] C. Martini, G. Palombarini, G. Poli, D. Prandstraller; Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, Institute of Metallurgy, Bologna, Italy, 2004.
- [7] Zimmerman C.; Steel heat treating fundamentals and processes, ASM Handbook (710.-722.), USA, 2013.
- [8] Landek, D., Matijević B.; Predavanja i vježbe iz kolegija “Tribologija i inženjerstvo površina“, dio Inženjerstvo površina, FSB, Zagreb, 2023/2024.
- [9] Dybkov V.I.; Basics of formation of iron boride coatings, Journal of mineral metal and material engineering(30-46), Institute of Problems of Materials Science, Kyiv, Ukraine, 2016.
- [10] M.A. B’ejar, E. Moreno; Journal of Materials Processing Technology 173 (352–358), Chile, 2006
- [11] Jelaska, D.; Elementi strojeva: skripta za studente Industrijskog inženjerstva, Split, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Sveučilište u Splitu, 2005.
- [12] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček i L. Ćurković, Materijali 1, FSB, Zagreb, 2014.
- [13] Hutchings, I.M.; Applications of the micro-scale abrasion test for coatings and bulk materials, University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Cambridge, UK, 2000.
- [14] Steel 1.0503 / C45, <https://xometry.pro>, 12.02.2025.

PRILOZI

I. Rezultati ispitivanja hrapavosti boriranih uzoraka

Oznaka	Parametri hrapavosti (μm)		
	Ra	Rz	Rmax
B2	0,928	6,324	7,363
B3	1,456	9,947	14,720
B4	1,604	10,740	13,250

II. Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom Vickers HV 0,5

Redni broj	Uzorak						
	2A	3A	4A		2B	3B	4B
1	851	965	1372		663	929	851
2	715	1372	905		438	905	1072
3	677	929	1030		692	1030	780
4	680	942	872		965	965	917
5	901	1183	1372		1030	929	1372
Srednja vrijednost	764,8	1078,2	1110,2		757,6	951,6	998,4
Standardna devijacija	104,1	194,2	246,1		241,1	48,8	235,1

III. Promjeri kalota mikroabrazijskog trošenja prije i nakon izlaganja otopini (mm)

Vrijeme trošenja (s)	Uzorak						
	2A	3A	4A		2B	3B	4B
120	1,032	0,891	1,131		0,861	1,135	1,096
	1,095	1,140	0,984		0,895	1,115	1,082
	1,134	0,940	1,161		0,896	1,111	1,109
Srednja vrijednost	1,087	0,990	1,092		0,884	1,120	1,096
180	0,908	1,200	1,048		1,163	1,234	1,209
	1,073	1,176	1,205		1,252	1,223	1,295
	1,217	1,368	1,333		1,245	1,306	1,278
Srednja vrijednost	1,066	1,248	1,195		1,220	1,250	1,260
240	0,940	1,248	1,378		1,348	1,435	1,407
	1,493	1,207	1,400		1,315	1,435	1,361
	1,442	1,282	1,368		1,392	1,364	1,438
Srednja vrijednost	1,292	1,246	1,382		1,352	1,411	1,402

IV. Volumeni otiska mikroabrazijskog trošenja prije i nakon izlaganja otopini (mm³)

Vrijeme trošenja (s)	Uzorak						
	2A	3A	4A		2B	3B	4B
120	0,0034	0,0024	0,0035		0,0015	0,0039	0,0035
180	0,0032	0,0060	0,0050		0,0054	0,0060	0,0062
240	0,0068	0,0059	0,0090		0,0082	0,0097	0,0095