

Dupleks postupci modificiranja i prevlačenja površina

Jukić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:775346>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Jukić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Božidar Matijević

Student:

Marko Jukić

Zagreb, 2021.

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ovaj rad napravio samostalno uz pomoć znanja stečenog na Fakultet strojarstva i brodogradnja te određenoj literaturi.

Zahvalio bih se na savjetima te pomoći mom mentoru, prof. dr. sc. Božidaru Matijeviću, dipl. ing., komentoru Filipu Žanetiću, mag. ing. i tehničaru Ivanu Vovku.

Također, zahvala i mojoj obitelji na bezuvjetnoj pomoći tijekom studiranja.

Marko Jukić



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: 02-2022	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - 151	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Jukić** JMBAG: **0035206584**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dupleks postupci modificiranja i prevlačenja površina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Duplex surface modification and coating processes**

Opis zadatka:

U strojarskoj praksi za produženje trajnosti konstrukcijskih dijelova i dijelova alata primjenjuju se različiti postupci inženjerstva površina, a suvremeni pravci istraživanja u tom području idu za kombiniranjem konvencionalnih postupaka s novijim suvremenim postupcima prevlačenja tkz. Duplex postupci. Iz tog razloga u radu je potrebno napraviti sistematizaciju kombinacija konvencionalnih i suvremenih postupaka modificiranja i prevlačenja koji se najčešće koriste u praksi. Za jednu odabranu kombinaciju postupaka u Laboratoriju za toplinsku obradu i Laboratoriju za inženjerstvo površina provesti eksperimentalni rad te uspješnost provedenih obrada utvrditi analizom mikrostrukture i kemijskog sastava na poprečnom presjeku uzoraka. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. ČELICI	2
2.1. Čelici za poboljšavanje	2
2.1.1. Mehanička svojstva i primjena čelika za poboljšavanje	3
2.1.2. Niskouglični čelik C45 (Č1530).....	4
3. BORIRANJE	5
3.1. Boridni slojevi.....	7
3.1.1. FeB sloj	8
3.1.2. Fe ₂ B sloj.....	9
3.2. Boriranje u prašku (granulatu)	9
3.3. Boriranje pastom	9
3.4. Boriranje u plinu	10
3.5. Boriranje u tekućem sredstvu.....	11
4. TVRDOĆA.....	12
4.1. Metoda po Brinellu	12
4.2. Metoda po Vickersu	14
4.3. Metoda po Rockwellu	15
5. EKSPERIMENTALNI DIO	17
5.1. DUBOKO BORIRANJE.....	17
5.2. OPIS POSTUPKA	17
5.2.1. Krivulje hlađenja.....	19
5.3. Mikrostruktura uzoraka.....	22
5.4. Mjerenje tvrdoće	24
6. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA.....	28
PRILOZI.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1.	Proizvodnja čelika po godinama [2].....	2
Slika 2.	Prikaz postupka poboljšavanja čelika [5].....	3
Slika 3.	Mikrostruktura poboljšanog čelika [8].....	3
Slika 4.	Uzorak od čelika C45	4
Slika 5.	Utjecaj temperature i vremena boriranja na debljinu sloja.....	5
Slika 6.	Prikaz boriranog sloja [6].....	6
Slika 7.	Mikrostruktura s „mekim jarkom“ [9].....	7
Slika 8.	Područje nastajanja boridnih slojeva [9].....	8
Slika 9.	Prikaz FeB sloja (crno) i Fe ₂ B sloja (bijelo) [11].....	8
Slika 10.	Boriranje u prašku [9].....	9
Slika 11.	Shema boriranja pastom [13]	10
Slika 12.	Shema boriranja u plinu [14].....	11
Slika 13.	Prikaz utiskivanja kuglice i otiska kod Brinell metode [15]	12
Slika 14.	Prikaz utiskivanja piramide i otiska kod Vickers metode [15]	14
Slika 15.	Shematski prikaz mjerenja tvrdoće Rockwell-ovom metodom [15].....	15
Slika 16.	Uređaj za mjerenje tvrdoće Rockwell metodom [16]	16
Slika 17.	Fe-Fe ₃ C dijagram [18].....	17
Slika 18.	Granulat	18
Slika 19.	Stavljanje uzoraka u peć.....	18
Slika 20.	Krivulja hlađenja peći	20
Slika 21.	Krivulja hlađenja granulata	21
Slika 22.	Prikaz temperature uzorka u peći	22
Slika 23.	Borirani uzorak, uvećanje 200x.....	22
Slika 24.	Borirani uzorak, uvećanje 500x.....	23
Slika 25.	Duboko borirani uzorak, uvećanje 200x	23
Slika 26.	Duboko borirani uzorak, uvećanje 500x	24
Slika 27.	Wilson – Wolpert Tukon 2100B	24
Slika 28.	Mjerenje tvrdoće na Wilson-Wolpert Tukon 2100B uređaju.....	25
Slika 29.	Prikaz rasporeda efektivne dubine boriranja	26

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike boridnih slojeva	7
Tablica 2. Hlađenje peći	19
Tablica 3. Hlađenje uzorka	20
Tablica 4. Tvrdća i efektivna dubina boriranja boriranog uzorka	25
Tablica 5. Tvrdća i efektivna dubina boriranja duboko boriranog uzorka	25

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV	-	tvrdća po Vickersu
HV0,1	-	mikrotvrdća po Vickersu
HB	-	tvrdća po Brinellu
F	N	primijenjena sila
S _k	mm ²	površina otiska kalote na uzorku
S _p	mm ²	površina otiska piramide na uzorku
d	mm	srednja vrijednost dijagonala kod Vickers metode
D	mm	promjer kuglice
X	-	stupanj opterećenja
HRC	-	tvrdća po Rockwellu
k	-	konstanta hlađenja granulata u peći
T _p	°C	temperatura peći
T _u	°C	temperatura uzorka
k _p	-	konstanta hlađenja peći
k _u	-	konstanta hlađenja uzorka

SAŽETAK

U radu su opisana svojstva i primjena čelika za poboljšavanje, preciznije čelika. Opisani su različiti postupci boriranja s naglaskom na boriranje u praškastom sredstvu, odnosno u granulatu te postupak dubokog boriranja. Objašnjene su i metode mjerenja tvrdoće s naglaskom na Vickers metodu koja se koristila u ovom radu.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je način na koji se provelo duboko boriranje čelika C45. Izračunato je dobivanje pojedinih krivulja hlađenja koje su bile potrebne za konačan problem, a to je vrijeme potrebno za hlađenje granulata na temperaturu ispod 723 °C (A_1 linije u Fe-Fe₃C dijagramu). Mikroskopom su dobivene i analizirane mikrostrukture. Uzorci su nakon toga metalografski pripremljeni kako bi se mogla izmjeriti i usporediti razlika u tvrdoći boriranog i duboko boriranog uzorka. Prikazane su i efektivne dubine boridnih slojeva za oba uzorka.

Ključne riječi: C45, duboko boriranje, Vickers metoda

SUMMARY

This paper describes mechanical properties of low-alloy steel C45. Different methods of boriding were explained with focus on boriding using boriding powder, and boriding method with variable temperature of process called deep boriding. Different methods of hardness testing were explained too, with an accent on Vickers method.

In the experimental part the way of deep boriding of C45 steel was explained. Different cooling curves were calculated, which were needed for solving the cooling problem of a deep borided sample. The problem was to calculate time needed for the sample to cool off from 900 °C to a temperature below 723 °C (A_1 line in the Fe-Fe₃C diagram). Microstructure of samples were obtained and analyzed. After that, samples were metallographically prepared so the difference of hardness of both samples could be measured and compared between each other. Also, the effective depth of a boron layer for both samples was graphically shown.

Key words: C45, Deep boriding, Vickers method

1. UVOD

C45 je čelik koji spada u skupinu ugljičnih čelika, preciznije srednjeugljičnih čelika. Oni imaju ferlitno – perlitnu mikrostrukturu. Uglavnom se primijenjuju za izradbu konstrukcijskih elementata. Također, pogodan je i za zavarivanje. Zbog svog kemijskog sastava (sadržaja ugljika) može se podvrgnuti postupku obrade koji se naziva poboljšavanje (sastoji se od kaljenja te naknadnog popuštanja na temperaturama višim od 500 °C). Time dobivamo veću čvrstoću, žilavost te granicu razvlačenja. Kaljenjem se nastoji dobiti što veća prokaljenost, odn. tvrdoća po poprečnom presjeku.

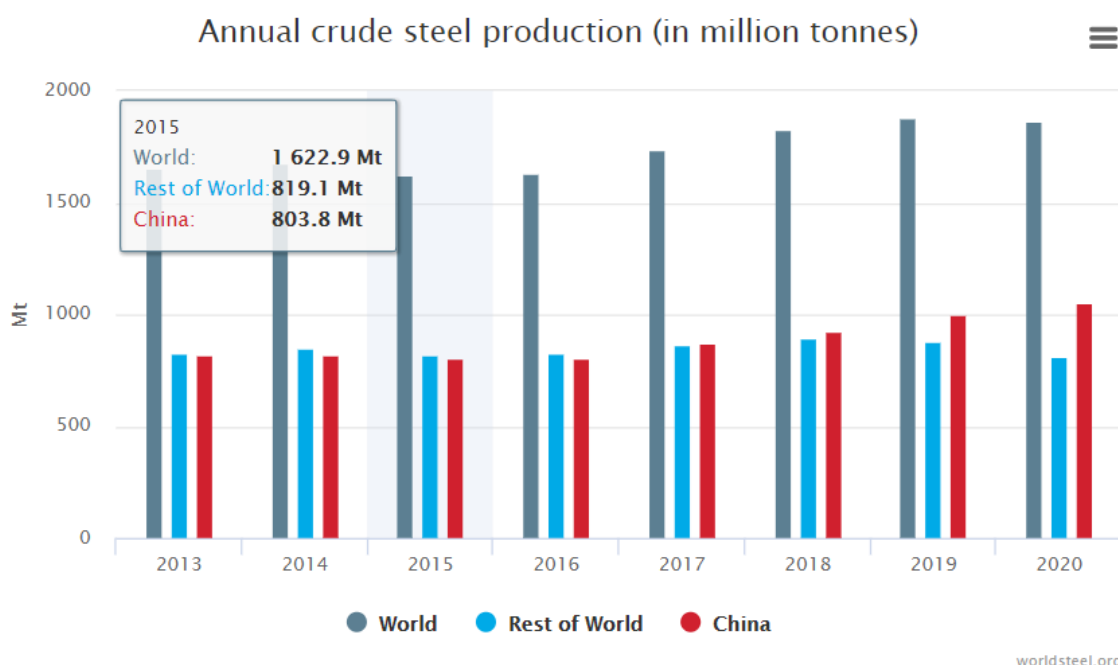
Dupleks postupci se sastoje od dva ili više postupaka prevlačenja ili modificiranja površina, odnosno neke kombinacija konvencionalnih postupaka s novijim suvremenim postupcima. Tim postupcima mogu se postići razne kombinacije strukture, odnosno postupaka, a sve to ovisi o namjeni i zahtjevima površine materijala podvrgnutom obradi. Svojstva kombinacije tih postupaka su takva kakve nijedan postupak sam za sebe ne može ostvariti. Ti postupci se danas sve više i više upotrebljavaju, bilo to u zrakoplovstvu, autoindustriji itd.

Boriranje je toplinsko – difuzijskih postupak obrade kod koje se u površinu čelika difundira kemijski element bor (B) te prilikom toga dolazi do stvaranja slojeva borida na površini čelika. Postupak se provodi na temperaturama do 800 - 1100 °C i traje nekoliko sati. Dubina dobivenog sloja može varirati između nekoliko desetaka μm pa do 0,3 mm. Tvrdoće boridnih slojeva mogu iznositi do 2100 HV. Boridni slojevi koji nastaju na površini su FeB i Fe₂B.

Vickers metoda je najčešća metoda ispitivanja tvrdoće materijala. Princip ove metode je da se u materijal utiskuje neki tvrdi materijal koji se naziva indentor ili penetrator. Kod Vickers metode indentor je dijament koji je najtvrdi materijal od svih. Indentor je oblikom istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od 136°.

2. ČELICI

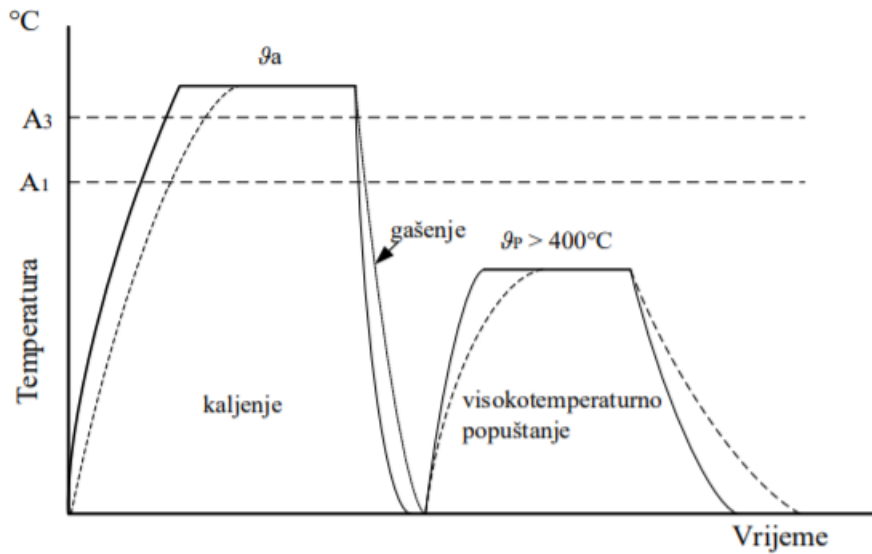
Čelik je metastabilno kristalizirana legura ugljika (do 2%) i željeza, uz prisutne pratioce poput mangana i silicija, te nečistoće poput sumpora i fosfora. Također, mogu se dodati i neki legirni elementi za poboljšavanje određenih svojstva ili npr. korozijsku postojanost. Čelici se nakon lijevanja taljevina oblikuju postupcima deformiranja (prešanjem, kovanjem, valjanjem, itd.) u željeni oblik. Danas su najvažniji te najprimijenjeniji tehnički materijali u svijetu. Svjetska proizvodnja iznosi gotov 1,864 milijuna tona, a od zemalja Kina ima uvjerljivo najjaču proizvodnju. Razlog za tolikom uporabom čelika je taj što čelik daje dobru kombinaciju svojstava: žilavosti, vlačne čvrstoće, rezljivosti, oblikovanje deformiranjem, mala cijenu i niz drugih.



Slika 1. Proizvodnja čelika po godinama [2]

2.1. Čelici za poboljšavanje

To je skupina čelika koja sadrži 0,2 – 0,6 % ugljika. S obzirom na kemijski sastav spadaju pod kvalitetne i plemenite čelike jer im je maseni udio nečistoća, odnosno sumpora i fosfora nizak (<0,035). Imaju homogenu mikrostrukturu i vrlo nizak udio nemetalnih uključaka. Kao što im ime sugerira, ta skupina čelika se podvrgava postupku koji se naziva poboljšavanje. Poboljšavanjem se smatra kaljenje te naknadno visokotemperaturno popuštanje na temperaturama većim od 500 °C.



Slika 2. Prikaz postupka poboljšavanja čelika [5]

Kaljenjem se postiže što potpunija martenzitna mikrostruktura (veća prokaljenost), odnosno veća tvrdoća po poprečnom presjeku. Naknadnim popuštanjem ostvarujemo veću žilavost materijala. Na prokaljenost utječu: prokaljivost čelika, dimenzije te uvjeti gašenja.



Slika 3. Mikrostruktura poboljšanog čelika [8]

2.1.1. Mehanička svojstva i primjena čelika za poboljšavanje

Poboljšavanjem ovih skupina čelika cilja se na postizanje visoke granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, visoke žilavosti te dinamičke izdržljivosti. Radi tih razloga, primijenjuju se za dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja kao npr. osovine, zupčanike, vratila,

poluge, vijke itd. Upravo povećanje dinamičke izdržljivosti pridonosi da ne dođe do umora materijala jer u suprotnom, uslijed dugotrajnih naprezanja, došlo bi do oštećenja materijala.

2.1.2. Niskougljični čelik C45 (Č1530)

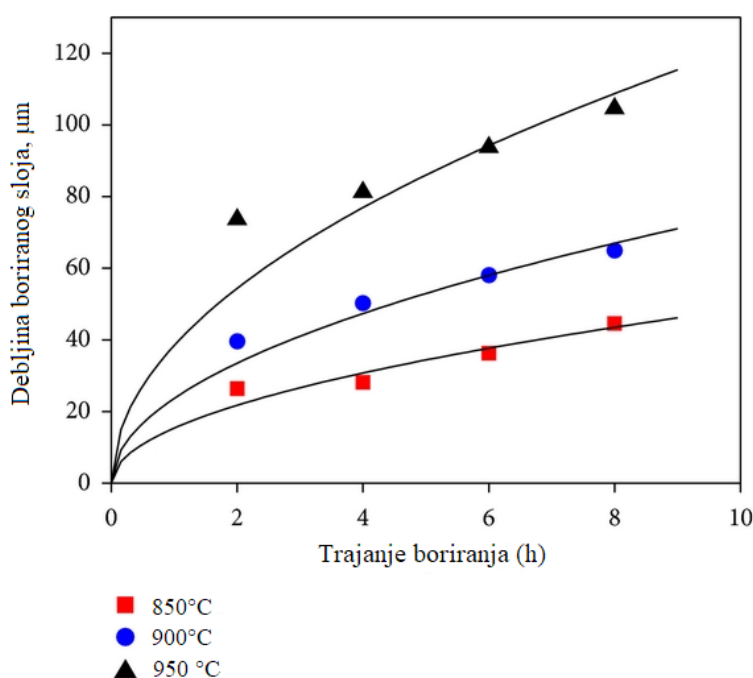
Čelik koji spada u skupinu ugljičnih čelika. Ugljični čelici se dijele na 3 skupine: niskougljični čelici (0,05 – 0,25 %C), srednjougljični čelici (0,25 – 0,6 %C) te visokougljični čelici (0,6 – 1,7 %C). C45 spada u skupinu srednjougljičnih čelika. U svom kemijskom sastavu sadrži sljedeće: do 0,5% C, do 0,4% Si, do 0,8% Mn, do 0,045% P i S, do 0,4% Cr, Ni i Mb. Zbog relativno male prokaljivosti primijenjuju se do promjera od 40 mm, iznimno 100 mm za slabije opterećene dijelove. Primijenjuju se za osovine, vijke, vretena, klipnjače, veće zupčanike u paru itd. Mikrostruktura mu je feritno – perlitna. Može se podvrgnuti normalizaciji između 840 – 880 °C. Unatoč relativno niskom sadržaju ugljika, pogodan je za zavarivanje.



Slika 4. Uzorak od čelika C45

3. BORIRANJE

Boriranje spada pod termo – kemijske postupke modificiranja površine. To je postupak difundiranja kemijskog elementa bora (B) u površinu čelika. Pritom na površini čelika nastaju željezni boridi (FeB i Fe_2B) koji imaju vrlo visoku tvrdoću (do 2100 HV). Boriranje se provodi na temperaturama između 750 – 1050 °C. Dubina i kvaliteta boridnog sloja ovise o nizu čimbenika: vrsti čelika, temperaturi, trajanju boriranja, sredstvu za boriranje, brzini ugrijavanja i ohlađivanja te naknadnoj toplinskoj obradi.



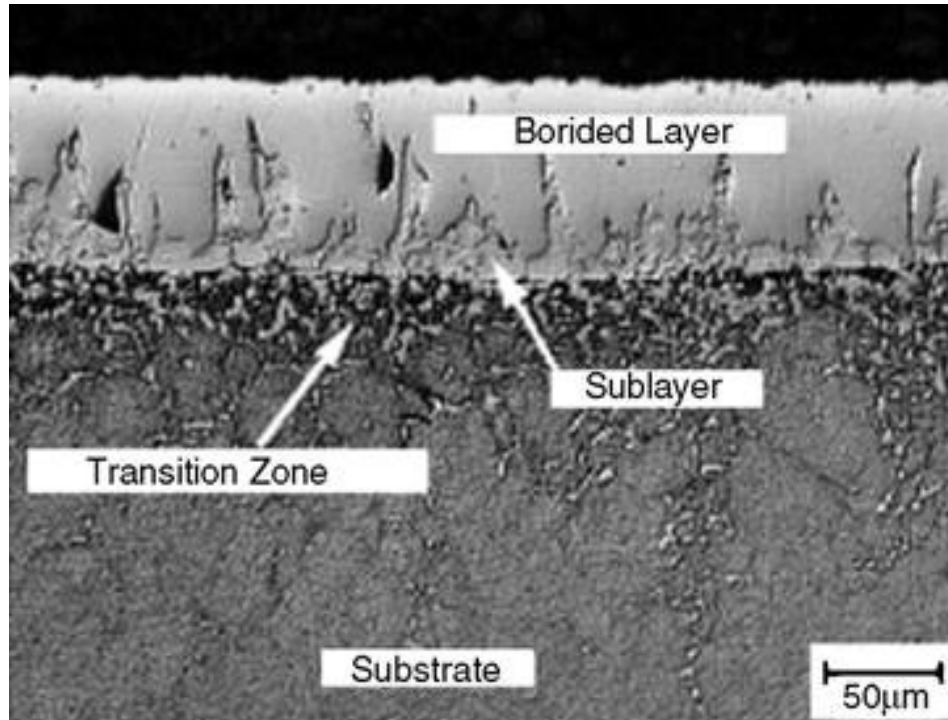
Slika 5. Utjecaj temperature i vremena boriranja na debljinu sloja

Trajanje postupka je između 1 – 8 sati. Može se provoditi u plinu, praškastom sredstvu (granulatu), pasti te tekućem sredstvu. Dubine nastalih slojeva kreću se između nekoliko μm pa do 0,3 mm.

Boriranjem se dobivaju odlična svojstva čelika, kao npr.:

- Vrlo visoka tvrdoća (1500 – 2200 HV)
- Odlična otpornost na trošenje, kavitaciju i eroziju
- Korozijska postojanost u kiselinama i lužinama, posebno klorovodičnoj kiselini (HCl)
- Izvrsna svojstva pri povišenim temperaturama (do 650 °C)
- Borirani slojevi se mogu polirati

- Nizak koeficijent trenja
- Moguće postići određenu debljinu sloja
- Moguće naknadno poboljšavanje nakon boriranja kod zakaljivih čelika
- Smanjena sklonost hladnom zavarivanju

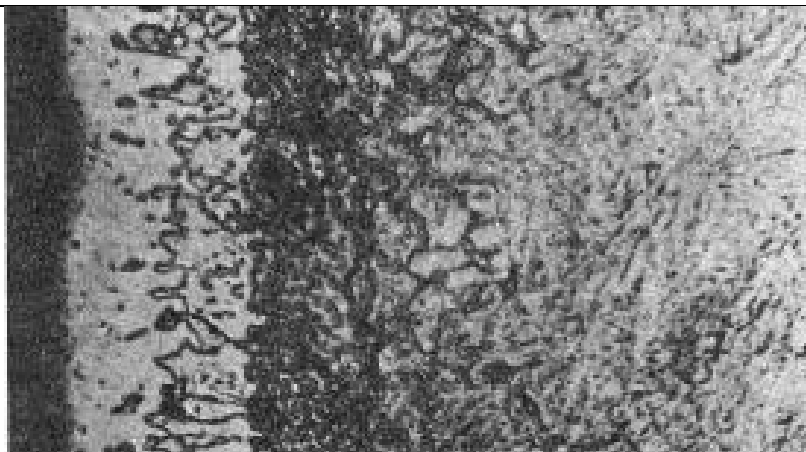


Slika 6. Prikaz boriranog sloja [6]

Primjena materijala koji se boriraju je dosta opširna. Stoga, boriranju se mogu podvrgnuti razni alati za: toplo kovanje, ekstrudiranje, provlačenje žice. Nadalje, opći dijelovi poput zupčanika, osovina, valjaka, klipova. Također, i komponente u proizvodnji nafte i plina (dijelovi ventila, spojnice ventila, mlaznice plametnika, proizvodnja cijevi).

Kod boriranja dolazi do pojave tzv. ugljikovog bedema. Ispod zubi boridnog sloja uslijed potiskivanja ugljika tijekom difuzije bora, dolazi do povećane koncentracije ugljika.

Silicij i aluminij imaju negativan utjecaj na boriranje. Ispod boridnog sloja dolazi do pojave „mekog jarka“ koja utječe na uvjete u eksploataciji. Dobiva se tvrd rub na mekoj podlozi. To se događa jer aluminij i silicij teže prema stvaranju ferita.



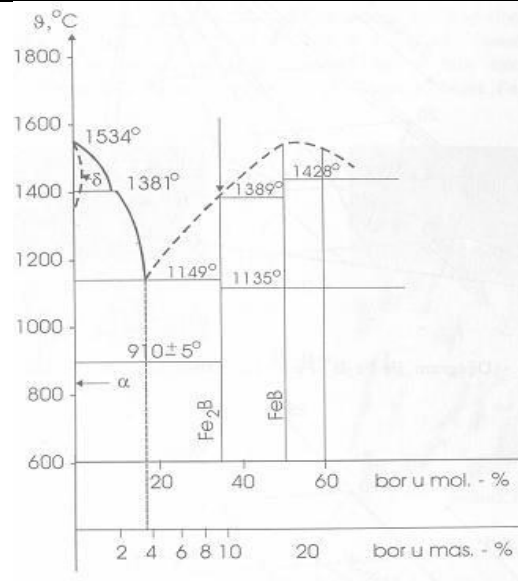
Slika 7. Mikrostruktura s „mekim jarkom“ [9]

3.1. Boridni slojevi

Boriranjem nastaju dva sloja: FeB i Fe₂B. Postojanje oba sloja istovremeno u čeliku je nepovoljno zbog toga što FeB sloj unatoč tome što može postići veće tvrdoće, izrazito je krhak i ima veći koeficijent toplinskog rastezanja stoga se teži prema dobivanju monofaznog Fe₂B sloja. Kao što je prikazano u tablici 3.1., FeB sloj ima manji postotak mase bora u spoju. To je bitno iz tog razloga što se postiže veći postotak mase bora u spoju, skloniji je nastanak dvojne faze FeB-Fe₂B sloja. Stoga, optimalni proces boriranja je formiranje Fe₂B sloja bez formiranja dvojne faze FeB-Fe₂B.

Tablica 1. Karakteristike boridnih slojeva

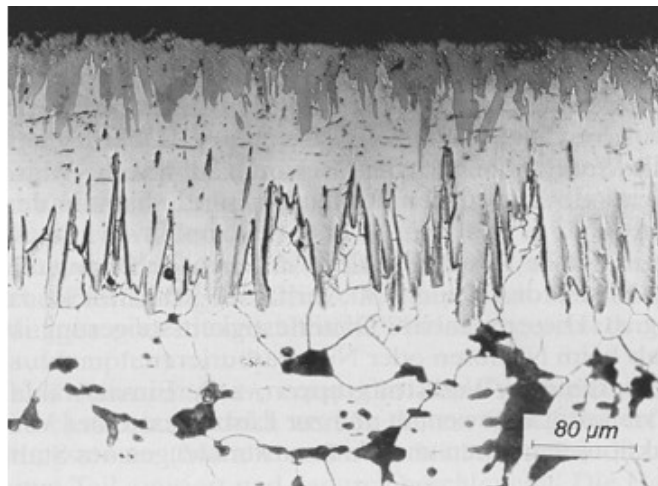
Tip boridnog sloja	Postotak mase B u spoju	Vrsta kristalne rešetke	Linearni koeficijent toplinskog rast., 10 ⁻⁶ m/mK	Tvrdoća HV0,1	Naprezanja u sloju
FeB	16,2	rombska	23	1900-2100	vlačna
Fe ₂ B	8,83	FCC	7,85	1800-2000	tlačna



Slika 8. Područje nastajanja boridnih slojeva [9]

3.1.1. FeB sloj

FeB sloj ima rombsku kristalnu rešetku. Prosječna udaljenost dva atoma bora u rešetci iznosi 178 pm, atoma bora i atoma željeza 215 – 220 pm, a dva atoma željeza 240–272 pm. FeB sloj postiže iznimno visoku tvrdoću od 1900 do 2100 HV_{0,1}, više nego Fe₂B sloj. Međutim, dosta je krhak i ima tendenciju “zamjeniti” željezo. Ima koeficijent toplinskog rastezanja koji iznosi $23 \cdot 10^{-6}$. Postotak mase u bora u sloju iznosi 16,2 %. U sloju se javljaju vlačna naprezanja. FeB na višim temperaturama od oko 325 °C postaje paramagnetičan¹.



Slika 9. Prikaz FeB sloja (crno) i Fe₂B sloja (bijelo) [11]

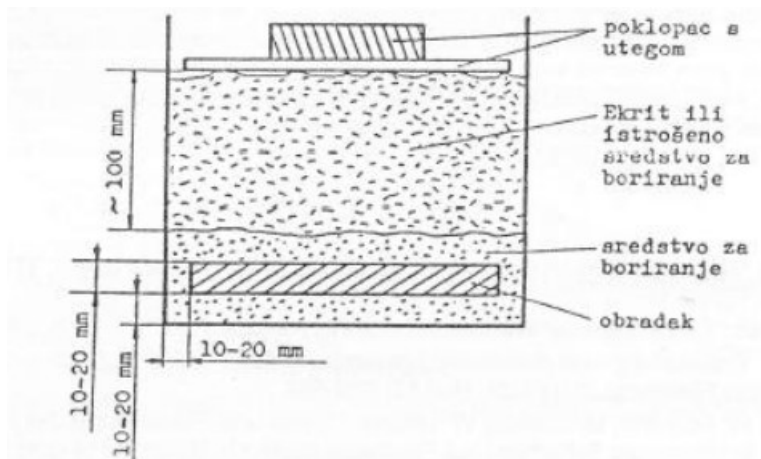
¹ Paramagnetizam je svojstvo mnogih tvari koje obilježava relativna magnetska permeabilnost nešto veća od 1. U paramagnetskom stanju magnetski momenti atoma slabo međusobno djeluju i nisu kolektivno uređeni.

3.1.2. Fe_2B sloj

Fe_2B sloj ima plošno centriranu kubičnu rešetku. Prosječna udaljenost dva atoma bora iznosi 213 pm, atoma željeza i bora 218 pm, a dva atoma željeza 240–272 pm. Fe_2B sloj postiže tvrdoće od 1800 – 2000 HV_{0,1}. Koeficijent toplinskog istežanja mu iznosi $7,85 \cdot 10^{-6}$. Postotak bora u sloju iznosi 8,83 %. U sloju se pojavljuju tlačna naprezanja. Posljedica nastajanja homogenog Fe_2B sloja na površini nakon boriranja je ta da čeliku daje odličnu otpornost na trošenje.

3.2. Boriranje u prašku (granulatu)

Danas najrasprostanjeniji postupka boriranja zbog svoje jednostavnosti. U prošlosti se kao prašak koristio amorfan bor, ali slojevi su bili tanki i porozni pa se od toga odustalo. Danas, granulati koji se koriste se sastoje od borkarbida (B_4C) i boraksa, a kao aktivator koristi se kalijumfluoroborat (KBF_4). Boriranje u prahu izvodi se na način da se u kutiju oblika kocke od vatropornog lima, debljine stijenke od 3 do 5 mm, ubacuje prašak na način da sa svake strane kutije bude 10 do 20 mm praška.



Slika 10. Boriranje u prašku [9]

Nakon toga, na prašak se stavlja ili već rabljeni prašak, ili vuna da bi se spriječio ulazak kisika. Na to sve se stavlja poklopac s utegom te nakon toga kutija se ubacuje u peć na kojoj se podešava temperatura boriranja. Nakon odgovarajućeg trajanja boriranja, kutija se vadi iz peći i hladi se na zraku. Ako je potrebno, može se izvršiti i naknadno kaljenje.

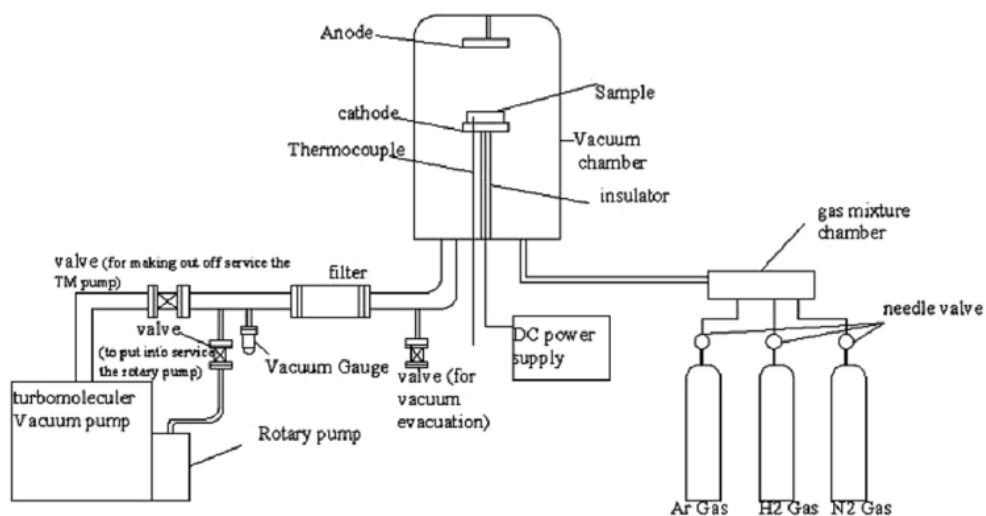
3.3. Boriranje pastom

U suvremeno doba, ovo je postupak koji se sve češće i češće primjenjuje. Prednost mu je ta što se može izvesti lokalno boriranje. Na uzorak se nanosi pasta debljine do 3 mm.

Posljedično to omogućuje manji utrošak sredstva koje je inače vrlo skupo. Glavni nedostatak je taj da je uzorak potrebno prethodno zagrijati u atmosferi nekog zaštitnog plina (Ar, He ili neka smjesa).

Ali, ako je potrebno parcijalno boriranje, tu se nameće niz prednosti ovog postupka:

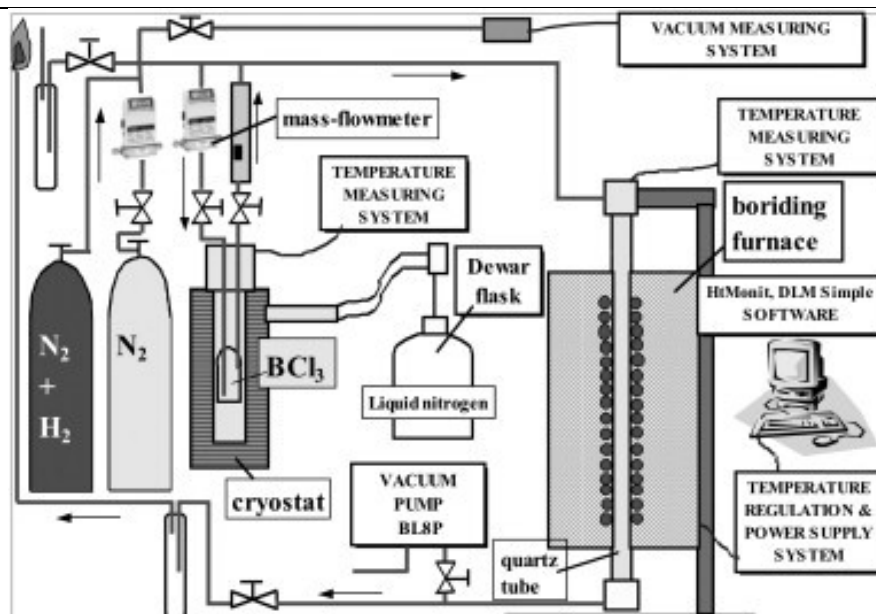
- Veoma manja potrošnja paste nego praška
- Jednostavnija priprema
- Manja potrošnja energije ugrijavanja (nema kutije ni praška koji je loš vodič topline)
- Postupak se može mehanizirati



Slika 11. Shema boriranja pastom [13]

3.4. Boriranje u plinu

Postupak koji se rijetko u praksi koristi. Glavni razlozi su to što plin koji se koristi za boriranje, borni hibrid i smjesa bornog triklorida s vodikom, izrazito skloni eksploziji, lako zapaljivi sa zrakom, vrlo skupi te otrovni.



Slika 12. Shema boriranja u plinu [14]

3.5. Boriranje u tekućem sredstvu

Boriranje u tekućem sredstvu se izvodi na 3 načina: u solnoj kupki bez ili sa elektrolizom te u tekućoj otopini s visoko frekventnim ugrijavanjem. Sredstvo koje se koristi kod solnih kupki s elektrolizom je boraks. Ovaj postupak ima nedostatak jer se nakon ohlađivanja na površini formira kora od soli koja se teško skida.

Kod postupaka bez elektrolize je slično. Inertna solna kupka ne daje zadovoljavajuće rezultate, stoga se i rijetko koristi u praksi. Kupka je sačinjena od NaCl ili KCl s dodatkom natriumborfluorida (NaBF_4) u koju je dodan borkarbid (B_4C).

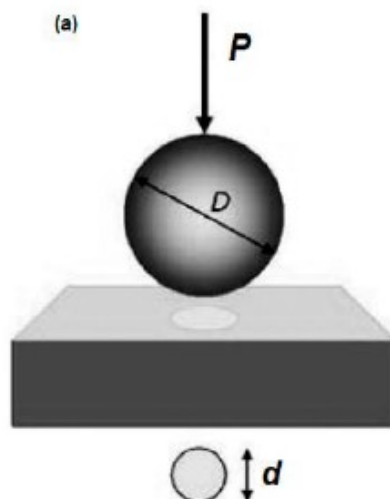
4. TVRDOĆA

Tvrdoća nekog materijala predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg predmeta. Svi materijali prema Mohs-u su svrstani u 10 razreda, od kojih je dijamant najtvrđi (tvrdoća 10). Najmekši materijal je puder (tvrdoća 1). Mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava, iako ne predstavlja egzaktno definirano mehaničko svojstvo. Prednost je to što se brzo ispita i nisu potrebni uzorci na kojima bi se ispitivala, nego se ispitivanje može odraditi i na gotovim proizvodima. S vremenom razvile su se različite metoda mjerenja tvrdoće, od kojih su 3 glavne:

- Metoda po Brinellu
- Metoda po Vickersu
- Metoda po Rockwellu
- Metoda po Knoopu

4.1. Metoda po Brinellu

Kod ove metode tijelo koje se utiskuje u metal pod nekom silom je kuglica od kaljenog čelika određenog promjera. Taj promjer može iznositi od 1 do 10 mm. Tijelo koje se utiskuje naziva se indenter ili penetrator. Za mjerenje tvrdih materijala koristi se kuglica od tvrdog metala. Kuglica u uzorku ostavlja otisak oblika kalote.



Slika 13. Prikaz utiskivanja kuglice i otiska kod Brinell metode [15]

Tvrdoća po Brinellu je dana sljedećim izrazom:

$$HB = \frac{F}{S_k} \quad (1)$$

Gdje je:

F – sila kojom se opterećuje kuglica, N

S_k – površina kalote koji u materijalu ostavi kuglica, mm²

Sila kojom se opterećuje kuglica je takva da promjer otiska (d) bude u sljedećem omjeru s promjerom kuglice (D):

$$d = (0,24 - 0,6)D \quad (2)$$

Iz ove jednadžbe zaključujemo da rezultat ovisi o primijenjenoj sili. To se naknadno reguliralo sljedećim izrazom:

$$F = \frac{X * D^2}{0,102} \quad (3)$$

Gdje je:

X – „stupanj opterećenja“, const. (različita za određene legure)

F – potrebna sila, N

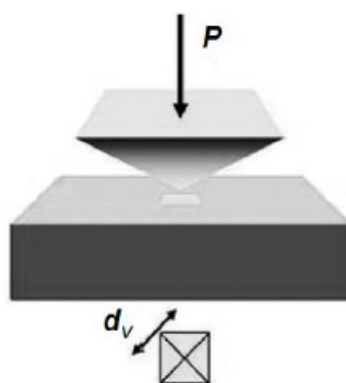
D – promjer kuglice, mm

Prednosti ove metode su to što se lako mjeri veličina otiska, metoda je selektivna i jednostavna je priprema površine, dovoljno je i grubo brušenje.

Nedostaci to što se mogu mjeriti materijali manjih tvrdoća, tvrdoća je ovisna o opterećenju i otisak koji ostane je relativno velik pa ako bi se mjerilo na gotovom proizvodu to ne bi bilo poželjno, stoga bi bilo najbolje upotrebljavati ovu metodu samo na uzorcima.

4.2. Metoda po Vickersu

Vickers je u odnosu na Brinellovu metodu uklonio dva glavna nedostatka, a to su: tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili te je moguće mjeriti i najtvrdje materijale. Prvi navedeni se riješio promjenom geometrije penetratora (istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica 136°) koji ostavlja otisak u obliku piramide. Kut od 136° je određen s razlogom jer se dobivaju vrijednosti neovisne o primijenjenoj sili. Drugi nedostatak je riješen primjenom dijamanta kao penetratora, odn. indentora.



Slika 14. Prikaz utiskivanja piramide i otiska kod Vickers metode [15]

Tvrdoća je dana sljedećim izrazom:

$$HV = \frac{F}{S_p}$$

(4)

Gdje su:

F – primijenjena sila, N

S_p – površina piramide utisnute u uzorku, mm^2

Kod Vickers metode o tvrdoći se zaključuje također iz veličine otiska. Primijenjena sile može varirati od 49 do 981 N. Otisci su vrlo maleni pa ne oštećuju površinu. Upotreba određene sile ovisi o debljini uzorka. Moguće je mjeriti i vrlo tanke uzorke upotrebom male sile. Za mjerenje

veličine otiska potreban je mjerni mikroskop (iako, danas postoje mjerni uređaji koji su digitalizirani). Osim brušenja, uzorak je potrebno ispolirati.

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale (d_1, d_2) piramide, a tvrdoća glasi:

$$HV = \frac{F * 0,189}{d^2}$$

(5)

Gdje su:

F – primijenjena sila, F

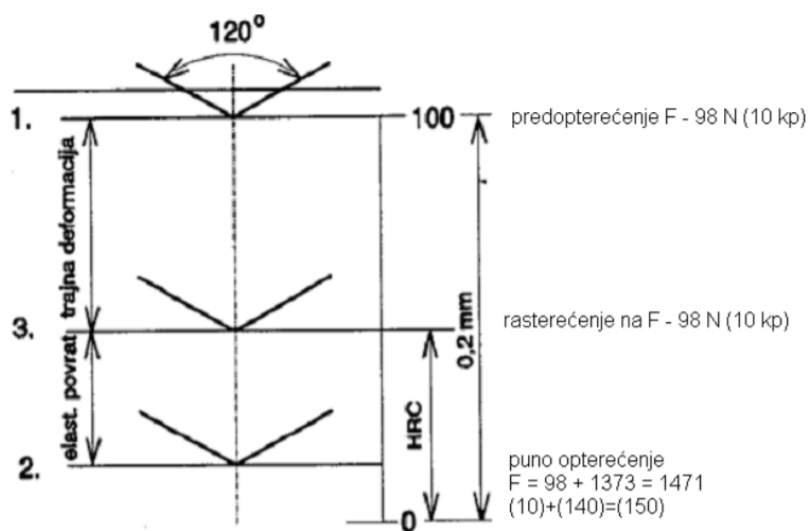
d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide $d = (d_1 + d_2) / 2$

Uz simbole HV pri rezultatima ispitivanja tvrdoće kao indeks se navodi i primijenjeno opterećenje (npr. HV5=200 znači da je sila utiskivanja iznosila $5 * 9,81$ N).

Vickersova metoda je jedina primijenjiva u znanstveno – istraživačkom radu na području materijala.

4.3. Metoda po Rockwellu

Kod ove metode se u uzorak utiskuje dijamantni stožac (HRC metoda) ili kuglica od kaljenog čelika (HRB metoda). Mogu se mjeriti samo metalni materijali. Kod Rockwellove metode se, za razliku od prethodnih metoda, mjeri dubina prodiranja indentora, a ne veličina otiska.



Slika 15. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće Rockwell-ovom metodom [15]

U položaju 1 indentor se predopterećuje silom $F = 98 \text{ N}$ zbog čega indentor prodire ispod površine uzorka. Ta točka je i početni položaj za mjerenje dubine prodiranja. Ukupna moguća dubina iznosi $0,2 \text{ mm}$ i podijeljena je na 100 dijelova. Što je materijal tvrdi, bit će i manja dubina prodiranja. Nakon predopterećenja, slijedi glavno opterećenje i položaj 2. Glavno opterećenje iznosi 1373 N . Stoga, u položaju 2, indentor je opterećen s ukupno silom od 1471 N . Nakon toga, slijedi rasterećenje glavnog opterećenja, ostaje samo predopterećenje, a indentor se radi elastičnosti materijala vraća u položaj 3. Ta dubina predstavlja tvrdoću, tj. u tom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera.

Ova metoda se dosta rijetko koristi, ali prednosti su joj što je mjerenje brzo i nije potrebna priprema površine, može se stoga koristiti u nekim pogonskim uvjetima ili kontroli poluproizvoda. Valja istaknuti kako je metoda i neprecizna ($\pm 2 \text{ HRC}$).

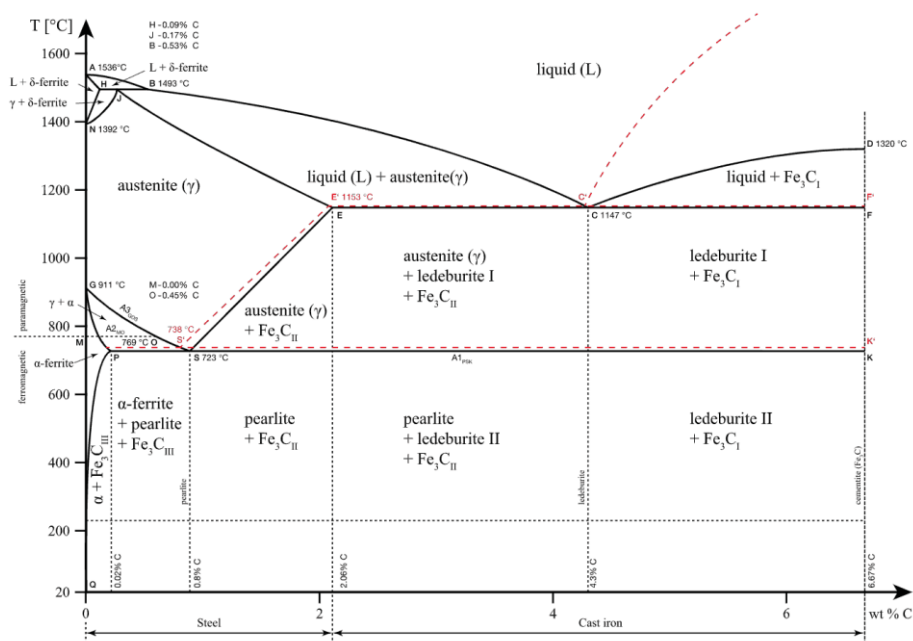


Slika 16. Uređaj za mjerenje tvrdoće Rockwell metodom [16]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. DUBOKO BORIRANJE

Debljina boriranih slojeva povećanjem temperature obrade te vremenskim trajanjem raste. “Dubokim boriranjem“ monofaze Fe_2B (koja nastaje prije FeB faze u postupku boriranja) sprječava se rast koncentracije bora na razinu na kojoj se počinje formirati FeB faza, a istodobno omogućiti daljnju difuziju atoma bora u čelik. Jedan način kojim se može omogućiti daljnji porast debljine boridnih slojeva je ubacivanje uzoraka u atmosferu inertnog plina (npr. argona) bez prisutnosti bora (granulata). Drugi način za to je da se čelik s temperature boriranja hladi na temperaturu ispod linije A_1 koja iznosi $723\text{ }^\circ\text{C}$ ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ dijagram). Hlađenjem na tu temperaturu iz austenita koji posjeduje FCC rešetku, dobivamo ferit koji omogućuje bolju difuziju atoma bora u čelik zbog svoje BCC rešetke te samim time formiranje veće debljine boriranog sloja.



Slika 17. Fe-Fe₃C dijagram [18]

5.2. OPIS POSTUPKA

U radu je provedeno ispitivanje na uzorcima čelika C45. Cilj rada je bio ispitati mogućnost povećanja efektivne dubine boridnog sloja. Prethodno boriran uzorak u kutiji od vatrootpornog lima, u kojoj se nalazi i granulata, se ubacio u peć koja je zagrijana na $900\text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 18. Granulat



Slika 19. Stavljanje uzoraka u peć

Nakon što se uzorak zagrijao do temperature od 900 °C, peć se postavila da se hladi na 600 °C. Na taj način i uzorak u peći se počinje hladiti. Za dobivanje vremena koje nam je potrebno za hlađenje uzorka u peći s temperature 900 °C na temperaturu ispod 723 °C, potrebno je bilo odrediti ohlađivanje peći te granulata na zraku u odnosu na vrijeme. Peć se zagrijala na 224 °C te se mjerio pad temperature u peći do 191 °C. Granulat koji je bio zagrijan u peći na 159 °C, na zraku se hladio do 42 °C. Iz tih podataka mogle su se odrediti krivulje ohlađivanja peći te granulata na zraku (Newtonova metoda hlađenja) i naposljetku dobiti konačnu krivulju, a to je hlađenje granulata u peći koja se s 900 °C podešavala na 600 °C.

5.2.1. Krivulje hlađenja

$$\frac{dT}{dt} = k(T_p - T_u)$$

(6)

Temeljem izmjerenih podataka o hlađenju peći (tablica 4), računa se k_p :

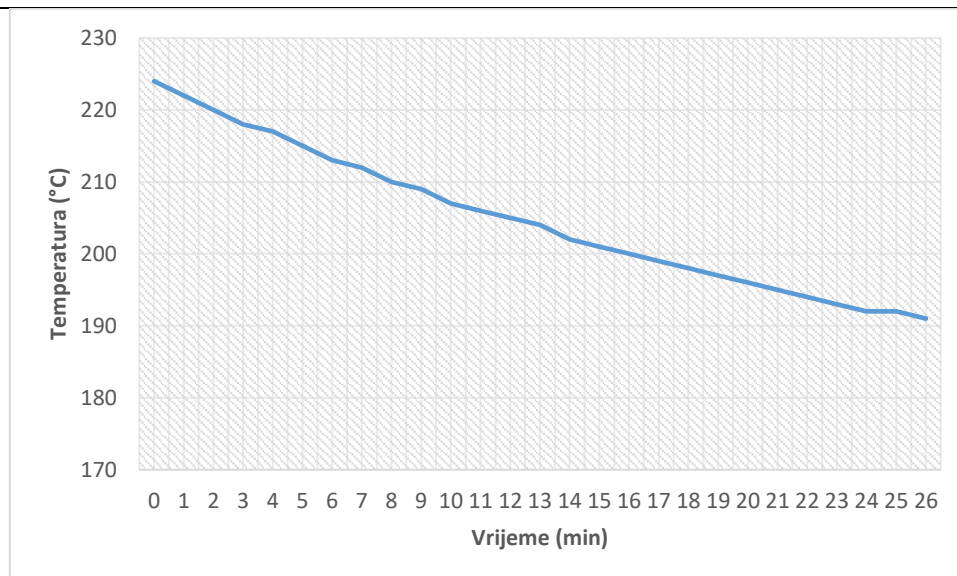
Tablica 2. Hlađenje peći

Temperatura u peći s kutijom	Vrijeme proteklo (min)
224	0
222	1
220	2
218	3
217	4
215	5
213	6
212	7
210	8
209	9
207	10

Početni uvjeti su:

- $t = 0 \text{ min}, T = 224 \text{ °C}$
- $t = 7 \text{ min}, T = 212 \text{ °C}$

Iz kojih se dobiva $k_p = 0,0088852$



Slika 20. Krivulja hlađenja peći

Formula hlađenja peći u odnosu na vrijeme glasi:

$$T_p(t) = 875e^{-0.0088852t} + 25$$

(7)

Temeljem izmjerenih podataka o hlađenju uzorka (tablica 3), računa se k_u :

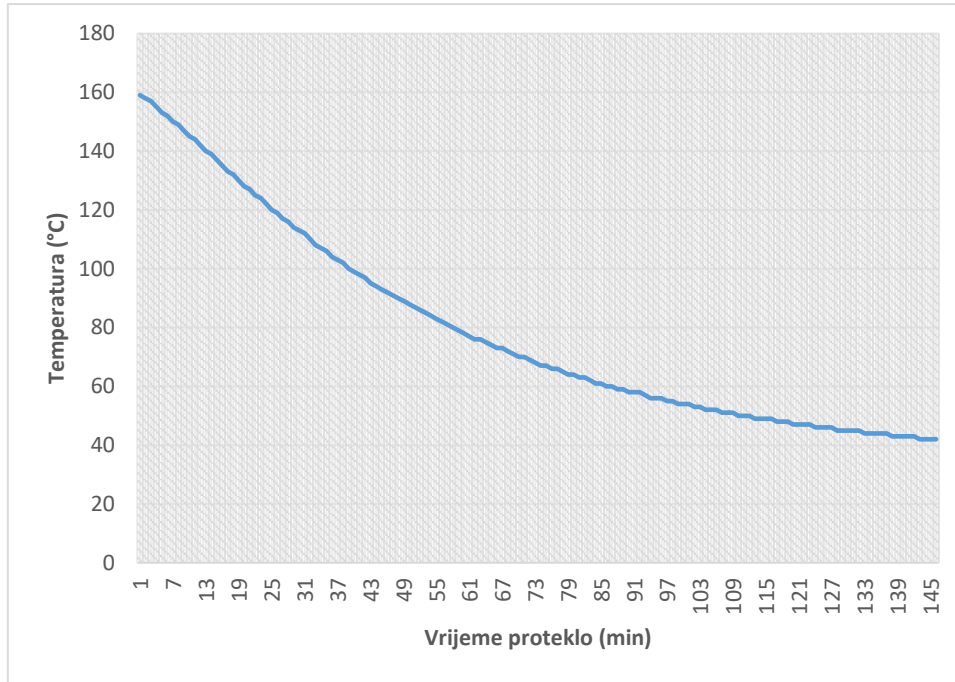
Tablica 3. Hlađenje uzorka

Temperatura uzorka, °C	Vrijeme proteklo (min)
159	0
158	1
155	3
114	28
112	30
110	31
108	32
69	71
68	72
67	74
56	94
56	95
55	97
54	98
54	99
54	100
53	101
53	102
52	103

Početni uvjeti su:

- $t = 0 \text{ min}$, $T = 159 \text{ °C}$
- $t = 98 \text{ min}$, $T = 54 \text{ °C}$

Iz kojih se dobiva $k_u = 0,01561$



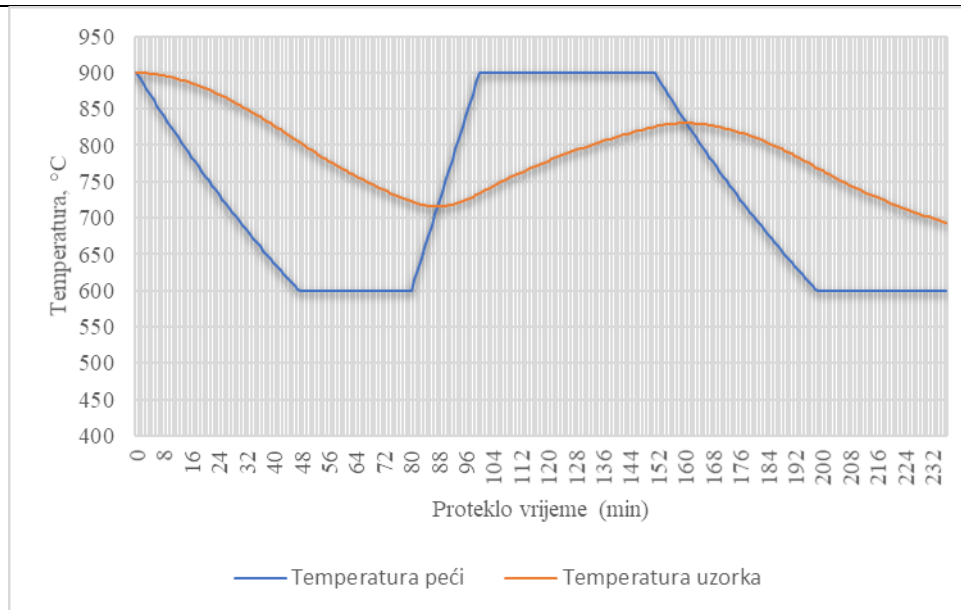
Slika 21. Krivulja hlađenja granulata

Formula hlađenja uzorka u odnosu na vrijeme glasi:

$$Tu(t) = 875e^{-0.01561t} + 25$$

(8)

Naposljetku, iz jednadžbe (6) dobiva se rješenje konačnog problema, a to je vrijeme potrebno za hlađenje uzorka sa 900 °C na temperaturu ispod 723 °C koje iznosi 80 min. Na Slika 22. prikazan je dijagram hlađenja uzorka u peći koji je trajao 4 sata.



Slika 22. Prikaz temperature uzorka u peći

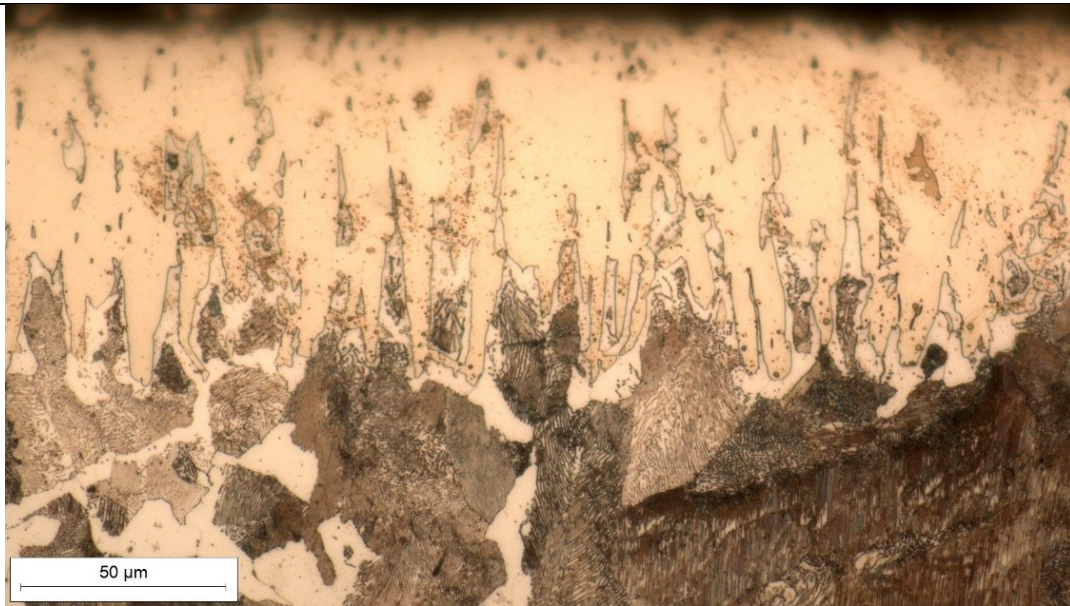
5.3. Mikrostruktura uzoraka

Mikroskopskom analizom boriranih i duboko boriranih uzoraka zaključuje se:

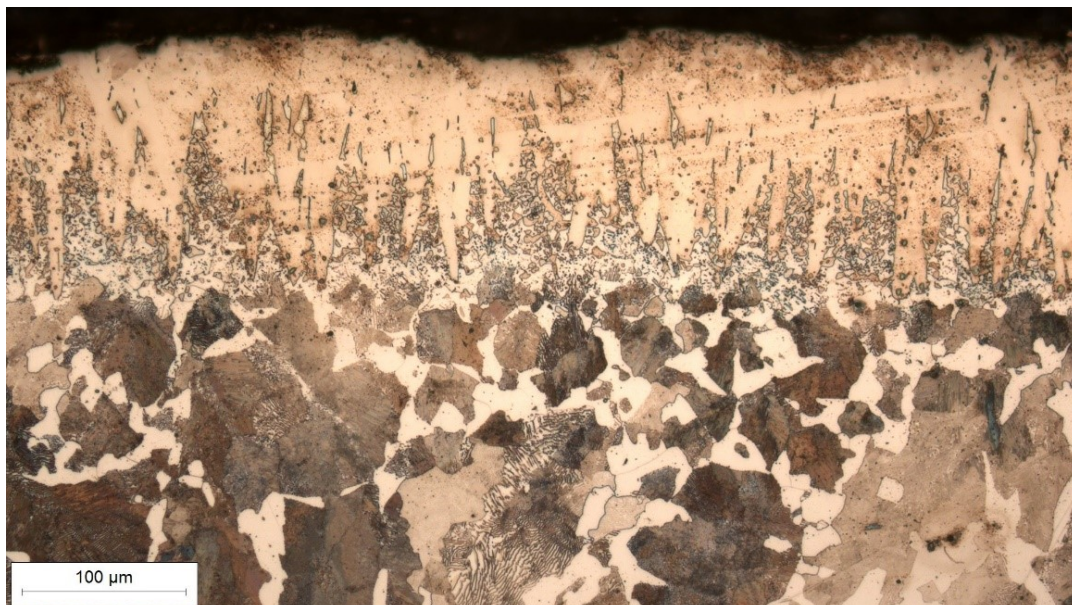
- Na svim uzorcima došlo je do formiranja boridnih slojeva
- Na boriranim uzorku jače su istaknuti „zubi“ na Fe_2B komponenti (Slika 23. i Slika 24.)
- Na duboko boriranom uzorku manje su istaknuti zubi i postigla se veća debljina sloja (Slika 25. i Slika 26.)



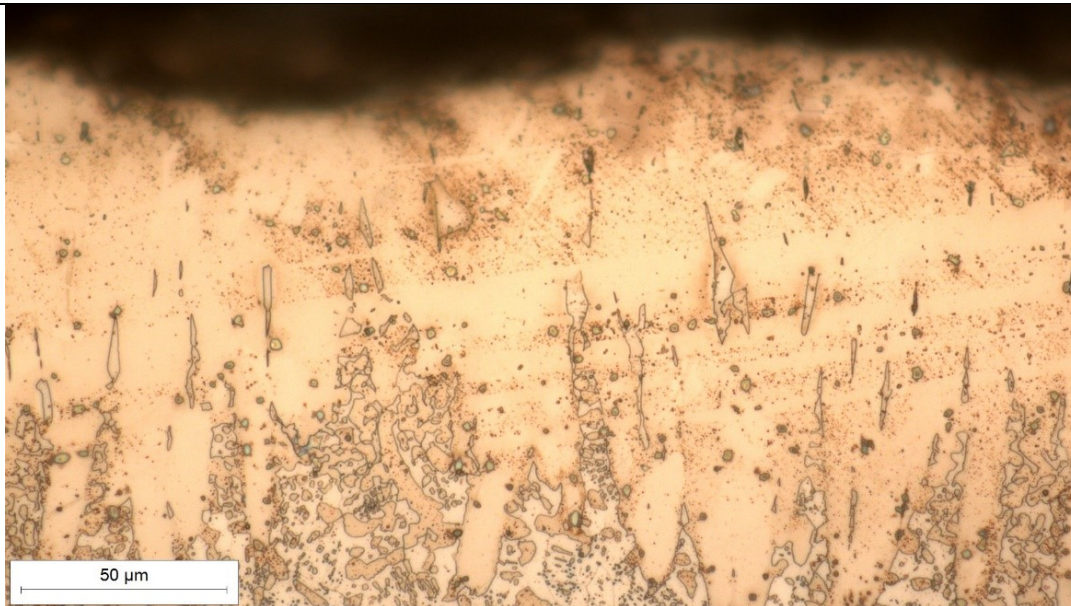
Slika 23. Borirani uzorak, uvećanje 200x



Slika 24. Borirani uzorak, uvećanje 500x



Slika 25. Duboko borirani uzorak, uvećanje 200x



Slika 26. Duboko borirani uzorak, uvećanje 500x

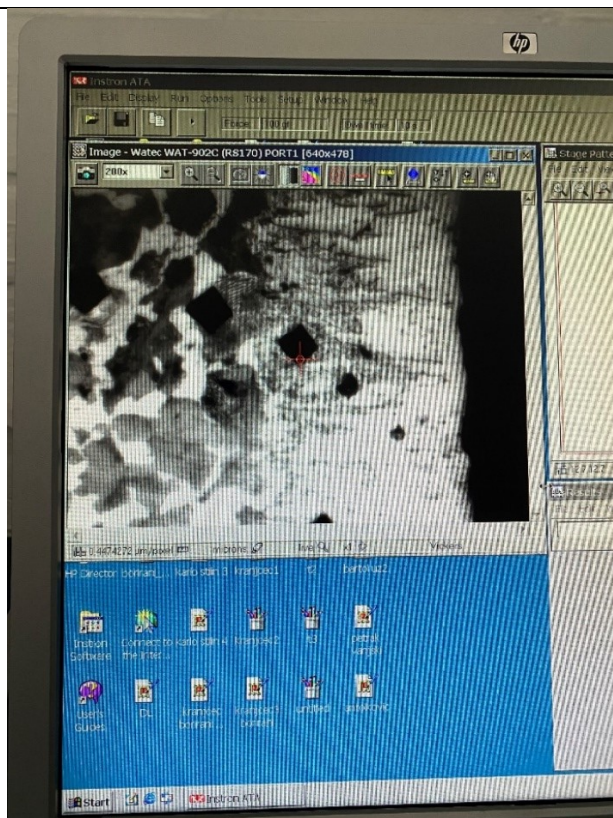
Slabije izraženi zubi kod duboko boriranog uzorka su posljedica daljnje difuzije atoma bora u čelik. Na nijednom uzorku nije se stvorila FeB komponenta.

5.4. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća se mjerila Vickers metodom. Za mjerenje tvrdoće koristio se uređaj Wilson – Wolpert Tukon 2100B. Uzorci su prije mjerenja rezani, brušeni, polirani te nagriženi u nitalu (3%). Nakon prodiranja indentora, uređaj grafički na računalo prikazuje mikrostrukturu gdje se također nalazi i otisak kojeg indentor ostavi. Zatim se označi područje oko otiska i računalo izbacuje vrijednost tvrdoće na određenim udaljenostima od ruba.



Slika 27. Wilson – Wolpert Tukon 2100B



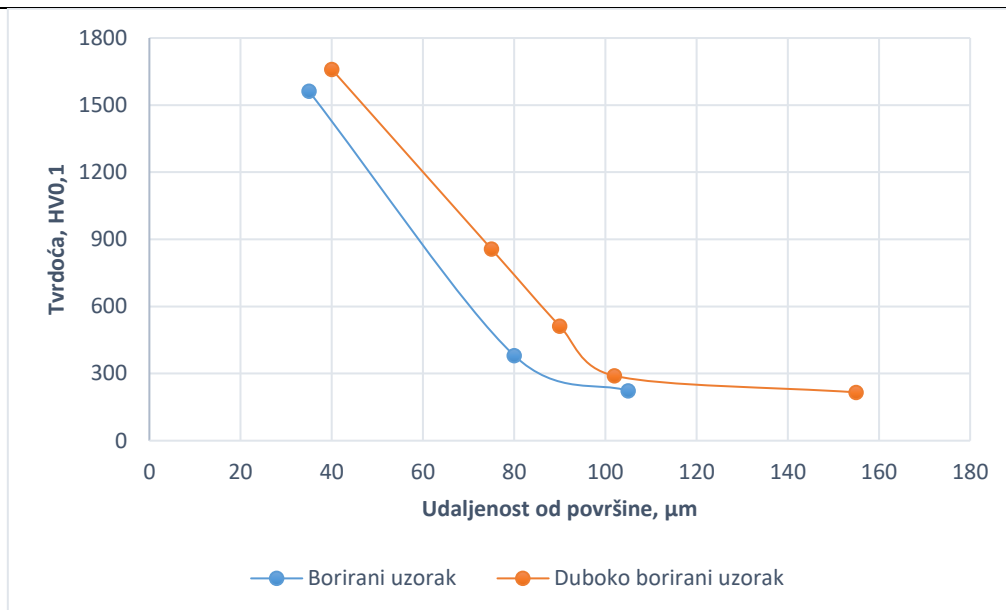
Slika 28. Mjerenje tvrdoće na Wilson-Wolpert Tukon 2100B uređaju

Tablica 4. Tvrdoća i efektivna dubina boriranja boriranog uzorka

Udaljenost od površine, μm	35	80	105
Tvrdoća, HV0,1	1562	381	223

Tablica 5. Tvrdoća i efektivna dubina boriranja duboko boriranog uzorka

Udaljenost od površine, μm	40	75	90	102	155
Tvrdoća, HV0,1	1660	857	513	290	216



Slika 29. Prikaz rasporeda efektivne dubine boriranja

Uzorak koji je duboko boriran pokazuje povećanje tvrdoće u odnosu na borirani uzorak. Iznimno velike razlike u tvrdoći počinju na dubinama od 50-ak μm (Slika 29.). To se može također isčitati iz toga da borirani uzorak na dubini od 105 μm ima tvrdoću od 290 HV0,1, dok duboko borirani uzorak postiže skoro jednaku tvrdoću (216 HV0,1) na dubini od 155 μm , znači 50 μm više.

6. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu zadatka provedeno je boriranje čelika C45. Nakon metalografske pripreme, uzorak je podvrgnut naknadnoj obradi kod koje se uzorak u peći hladio na temperaturu ispod 723 °C (duboko boriranje) s ciljem promjene mikrostrukture. Promjenom mikrostrukture nastojalo se omogućiti daljnju difuziju bora u čelik, što za posljedicu ima povećanje efektivne dubine boridnog sloja. Temeljem tog postupka, zaključuje se sljedeće:

- Dubokim boriranjem mogu se postići veće dubine boridnog sloja nego kod boriranja
- Mogućnost dobivanja veće tvrdoće materijala kod dubokog boriranja
- Dubokim boriranjem mogu se postići vrlo mali udjeli nepoželjnog FeB sloja

LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Uglji%C4%8Dni_%C4%8Delik
- [2] <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/Global-crude-steel-output-decreases-by-0.9--in-2020.html>
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=13250>
- [4] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2013.
- [5] Golubić, S.: *Tehnički materijali, Predavanja*, Bjelovar, 2019.
- [6] https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5_727
- [7] Matijević, B.: *Predavanja iz kolegija Tribologija i inženjerstvo površina, Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb, 2018.
- [8] Landek, D.: *Predavanja iz kolegija Toplinska obrada*, FSB, Zagreb, 2016.
- [9] Landek, D.: *Podloge za vježbe iz kolegija Toplinska obrada*, FSB, Zagreb, 2016.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_boride
- [11] https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-borided-layer-on-the-EN-C15-steel-consisting-of-FeB-dark-and-Fe-2-B_fig1_224829171
- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Paramagnetizam>
- [13] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-plasma-paste-boronizing-device_fig1_229165476
- [14] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580312001854>
- [15] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Čurković L.: *Materijali I*, Zagreb, 2011.
- [16] <https://metal-kovis.hr/webshop/price/7564/rockwell-type-hardness-tester-eh-3r>
- [17] HTS: *Boriding for wear resistance*, 2014., str. 41-44
- [18] <https://www.wikiwand.com/bs/%C4%8Celik>
- [19] Žanetić, F.: *Boriranje niskolegiranog čelika c45 s naknadnim difuzijskim žarenjem*, 2021.

PRILOZI

1. CD-R disk