

Željko Stojanović^{1*}, Sanja Stanisavljev²

¹"Šinvoz" d.o.o., Zrenjanin, Srbija, ²Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, Srbija

Pregledni rad
ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585
UDC: 622.785:621.78:66.04
doi: 10.5937/zasmat1902190S



Zastita Materijala 60 (2)
190 - 196 (2019)

Pregled problema difuzionog boriranja u industrijskoj primeni

IZVOD

U ovom radu, sistematizovan je pregled problema koji se javljaju prilikom izvođenja postupka boriranja, a koji svojom pojavom ograničavaju njegovu širu i svestraniju industrijsku primenu. U radu je skrenuta pažnja na sve nedostatke koji narušavaju integritet boridnog sloja i koji utiču na smanjenje njegove pouzdanosti u teškim eksploatacionim uslovima. Istraživanja su bila usmerena u pravcu prikazivanja ograničenja i neadekvatnosti postupaka boriranja u čvrstom, tečnom i gasovitom sredstvu u smislu njihovog doprinosa niskoj efikasnosti proizvodnje i neopravdano visokim troškovima proizvodnje. Razmotreni su nepovoljni uticaji krtosti i formiranja pukotina koji dovode do loma i do ljuštenja boridnog sloja, problemi izbora visokih temperatura procesa koje mogu štetno delovati na osnovni materijal, ali i ostale greške koje se trebaju izbeći u cilju postizanja optimalnih karakteristika boridnih slojeva. Ostajući u ovom kontekstu, posebna pažnja je posvećena učestalim faktorima koji imaju najveći uticaj na pogoršanje mehaničkih osobina boridnih slojeva, posebno dinamičke čvrstoće i žilavosti.

Ključne reči: boriranje, krtost, pukotine, žilavost, temperature.

1. UVOD

Jedna od metoda za poboljšanje svojstava površinskih slojeva je difuzioni postupak boriranja. Nakon difuzionog boriranja, delovi mašina i alata imaju smanjenu osetljivost na habanje, posebno u slučaju potpunog nedostatka ili ograničenja podmazivanja [1]. Difuzioni boridni sloj ima mnoge prednosti kao što su visoka tvrdoća, dobra otpornost prema koroziji u brojnim kiselinama i bazama i dobru otpornost na habanje. Međutim, treba imati u vidu da ovi slojevi imaju mnogobrojne nedostatke, a jedan od osnovnih nedostataka je krtost koja može prouzrokovati mikropukotine ili ljuštenje sloja. Ovi problemi mogu izazvati slabiju adheziju, propadanje ili čak naprsline boriranih uzoraka pod okolnostima kao što su pritisno opterećenje i visok toplotni udar [2,3]. Sa druge strane, temperatura boriranja je najveći faktor koji utiče na troškove procesa i na izbor materijala koji će se borirati. Povišene temperature mogu biti štetne za mehaničke osobine osnovnog materijala [4].

Za industrijsku namenu potrebni su jednofazni Fe₂B slojevi kako bi se izbegli krtost, stvaranje pukotina i ljuštenje, što je čest slučaj sa dvofaznim boridnim slojevima [5]. Pošto je FeB intermetalna faza krtija i tvrđa i ima viši koeficijent toplotnog širenja nego Fe₂B, često se primećuje pucanje dvoslojnog boridnog sloja. Slično prethodno navedenom, kod izvođenja postupaka boriranja uočeni su problemi koji imaju negativne ekonomske efekte, visoku cenu, visoku toksičnost i eksplozivnost što ograničava njihovu široku primenu u praksi. Kod boriranja u tečnoj sredini, na radnim komadima se formira čvrsto vezani sloj soli čije uklanjanje nakon završetka boriranja može biti veoma skupo. Kod boriranja u čvrstom sredstvu, koje se obično koristi u komercijalne svrhe, veće temperature tretmana i duže vreme trajanja tretmana predstavljaju njegove glavne nedostatke [6]. U poslednje vreme, postepeno raste broj studija sprovedenih na plazma boriranju. Proces plazma boriranja ima superiornu prednost u poređenju sa konvencionalnim tehnikama boriranja zbog svoje ekonomske efikasnosti, niže temperature procesa i lake kontrole eksperimentalnih parametara. Međutim, gasovi B₂H₆ i BCL₃, koji se koriste u plazma boriranju, a koji su skupi, otrovni i eksplozivni, predstavljaju glavni nedostatak. Štaviše, u procesu

*Autor za korespondenciju: Željko Stojanović

E-mail: zeljkoelemir@gmail.com

Rad primljen: 31. 01.2019.

Rad prihvaćen: 25. 04. 2019.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

plazma boriranja koji se odvija u BCL₃ okruženju boridni sloj ima pore, što predstavlja ogroman problem.

Pozivajući se na napred navedeno, teoretski cilj ovog rada je suštinski doprinos boljem razumevanju mehanizama i činilaca koji su odgovorni za nastajanje problema u postupku boriranja, putem njihove sistematizacije i deskripcije, ali i pokušaj ukazivanja na posledice njihovog pojavljivanja u datim okolnostima i uslovima eksploatacije. Praktični cilj ovog rada zasnovan je na upoznavanju sa praktično isprobanim načinima rada prilikom boriranja, sa ciljem stručnog izvršavanja zadataka i izbegavanja nastajanja problema koji umeju lako da se potkradu u boridnim slojevima.

2. NEDOSTACI U BORIDNIM SLOJEVIMA

2.1. Nastajanje krtosti boridnog sloja i njegove posledice

Shodno ranijim napomenama u uvodnom izlaganju ovog rada, FeB sloj bi trebalo izbegavati zbog njegove povećane krtosti, uprkos činjenici što je on tvrdi od Fe₂B faze. Krtost se povećava sa povećanjem debljine boridnog sloja, posebno zbog rasta FeB faze. Zbog dugotrajne izloženosti visokim temperaturama dolazi do ukрупnjavanja zrna u jezgru. Dakle, jezgro čelika gubi svojstvene karakteristike, kao što su čvrstoća i žilavost.

Boridne faze moraju ispunjavati osobine koje usporavaju ili modifikuju mehanizme otkaza u inženjerskim komponentama, a koje uključuju nisku adheziju između alata i materijala za obradu, hemijsku stabilnost, visoku tvrdoću i otpornost prema abraziji. Međutim, visoka tvrdoća vodi ka niskoj duktilnosti i žilavosti [7].

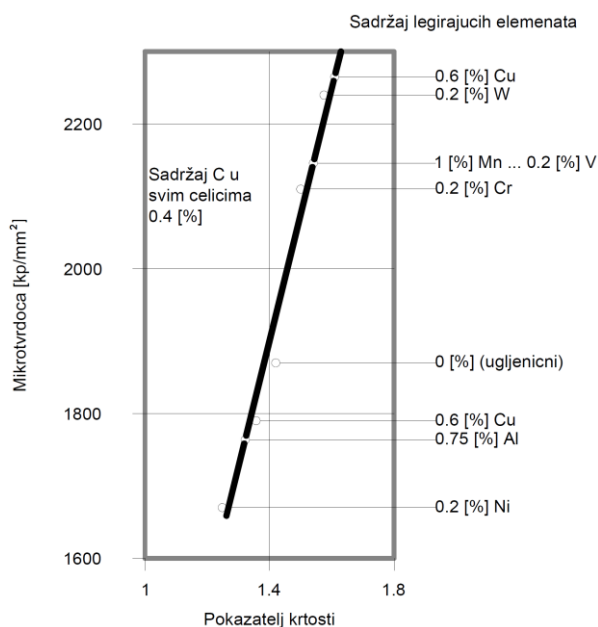
Tabela 1. Šema krtosti nitriranog sloja. Ako od N merenja Vickers-ove tvrdoće n_i merenja pripada grupi a_i , biće pokazatelj krtosti $P_k = \sum n_i a_i / N$ [8]

Table 1. Scheme of the nitriding layer brittleness. If from N measurements of the Vickers hardness n_i measurements belongs to a_i group, brittleness indicator will be $P_k = \sum n_i a_i / N$ [8]

Grupa a_i	Izgled otiska pri merenju Vickers-ove tvrdoće	Zaključak
1		Nije krt
2		Malo je krt
3		Krt
4		Vrlo krt

Problem krtosti boridnog sloja, do danas je ostao neraspavljen. Mada, prema navodima Pantelića, za visoke tvrdoće boriranog sloja, krtost je relativno niska, što se smatra najvećom vrednošću boriranja. Mnogi se autori slažu u tome da je krtost boriranog sloja manja nego krtost nitriranog ili cementiranog sloja, ali je ona još uvek nerešen problem boriranja [8]. Pantelić u svojim istraživanjima dalje navodi da su naučnici L.G. Voroshnin i L.S. Lyakhovich na čeliku sa 0.4% ugljenika, različito legiranim, upoređivali krtost boriranog sloja. U ovom radu su koristili uporednu skalu krtosti koja se inače primenjuje kod nitriranog sloja. Gradacija te skale nastaje prema vernosti otiska Vickers-ove ili Rockvell-ove piramide pri merenju tvrdoće, a konvencionalno je prihvaćena u literaturi Rusije. Ove gradacije su prikazane u tabeli 1.

Rezultati istraživača prikazani su na slici 1.



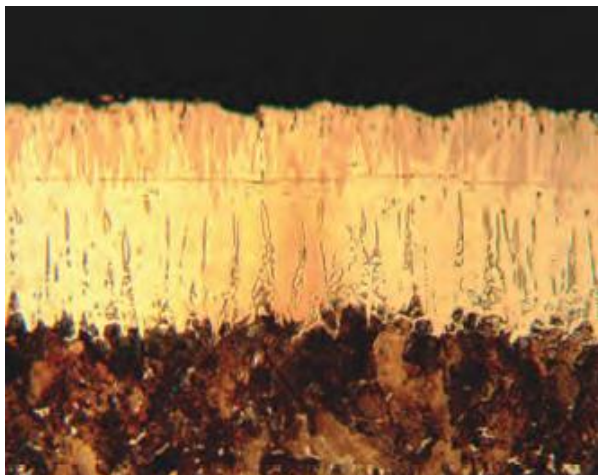
Slika 1. Zavisnost pokazatelja krtosti od tvrdoće boridnog sloja [8]

Figure 1. Dependence of the brittleness indicator from boride layer hardness [8]

Dok jednofazni Fe₂B sloj na železnim materijalima proizvodi površinu sa visokim pritisnim naprezanjima, FeB faza je veoma krta i razvija površinu izloženu visokim zateznim naprezanjima. Na kraju postupka boriranja, kada temperatura opadne na ambijentalnu, a ako je proizveden dvofazni boridni sloj, naprezanja iz takvih faza mogu dovesti do pucanja formacije na FeB/Fe₂B međusloju [9]. Zbog toga što ove faze proizvode različite koeficijente toplotnog širenja, ovo poslednje može da izazove cepanje vodeći do odvajanja dvofaznog

sloja, ili pak može doći do stvaranja pukotine pod mehaničkim naprežanjem ili termičkim i mehaničkim udarima, kao što je prikazano na slici 2.

U literaturi [10], takođe, je objavljeno da tribološke osobine zavise od mikrostrukture boridnog sloja. Dvofazni FeB/Fe₂B slojevi nisu inferiorni u odnosu na monofazne Fe₂B slojeve, pod uslovom da je porozna površinska zona direktno ispod površine uklonjena. Alternativno, preferira se tanji sloj zbog manjeg razvoja krte i porozne površine (zone) i ljuštenja.



Slika 2. Dvofazni boridni sloj na kome je nastala pukotina između FeB i Fe₂B sloja nakon hlađenja [11]

Figure 2. Dual-phase boride layer on which it was created crack between FeB and Fe₂B layer after cooling [11]

Objašnjavajući osobine boridnih zona i načine pripremanja površine komada za ispitivanje tvrdoće, Walter Fichtl [12] u svom radu prijavljuje da primena većih opterećenja kod ispitivanja tvrdoće Vickers-ovom ili Knoop-ovom metodom uglavnom dovodi do neispravnih rezultata, odnosno do pucanja sloja, kao što je prikazano na slici 3.

On dalje ističe da Rockwell-ove i Brinell-ove metode ispitivanja uopšte nisu prikladne za merenje boridnih zona, jer njihova upotreba dovodi do deformacije osnovnog materijala i, istovremeno, do uništavanja boridne zone. Shodno prethodnim navodima o uticaju debljine sloja na povećanje krtosti, na ovom mestu je potrebno istaći da debljina FeB sloja raste sa povećanjem ukupne debljine boridnog sloja, što nije poželjno, jer povećava lomljivost boridnog sloja. Pored toga velika debljina boridnog sloja je moguća samo kada se boriranje vrši dugo vremena, što dovodi do ukрупnjavanja zrna jezgra. Gruba zrna u jezgru, takođe, dovode do lomljivosti.



Slika 3. Optička mikrografija otiska Vickers-ove piramide pokazuje pukotinu u boridnom sloju formiranom na P20 alatnom čeliku [13]

Figure 3. Optical micrographics of Vickers piramide print showing crack in the boride layer formed at P20 tool steel [13]

2.2. Razlozi opadanja čvrstoće i žilavosti boriranog čelika

Boriranje ima različiti uticaj na statičku čvrstoću. Zatezna čvrstoća opada sa boriranjem, a pritisna čvrstoća raste sa porastom dubine boriranog sloja do jedne maksimalne vrednosti, pa zatim ponovo opada [8]. Savojna čvrstoća i granica $\sigma_{0,2}$ rastu najpre brzo sa porastom dubine sloja, a zatim sporije. Žilavost boriranog komada opada vrlo malo. Proučavajući osobine boriranih komada, Naruemon u svom radu naglašava da se žilavost boriranog čelika oslanja na debljinu boriranog sloja, površinu poprečnog preseka i na mehanička svojstva [14]. U svom radu, on dalje govori da je borirani uzorak sa debljinom boridnog sloja od 150 do 250 μm prilikom ispitivanja savijanja imao izduženje od 4% bez pucanja.

U jednom drugom istraživanju, Topuz je sa svojim saradnicima istraživao lomnu žilavost Fe₂B sloja formiranog na nerđajućem čeliku AISI 304. U ovom istraživanju uzorke su borirali u indirektno zagrejanoj peći sa fluidnim ležištem sa Ekabor 1 boridnim agensom na 1123, 1223 i 1323°K u trajanju od 1, 2 i 4 časa. Tvrdoću i lomnu žilavost borida merili su Vickers-ovom metodom. Na osnovu dobijenih rezultata zaključili su da su vrednosti lomne žilavosti smanjene sa povećanjem temperature i vremena boriranja. Debljina boridnog sloja se kretala između 12 i 176 μm . Tvrdoća borida kretala se između 1709 i 2119 HV₀₁, a lomna

žilavost bila je u rasponu od 2,19 do 4,47 Mpa x m (1/2), zaviseći od debljine i tvrdoće sloja [15]. Iz prethodnog istraživanja se može primetiti da su istraživači kod ispitivanja tvrdoće primenili malo opterećenje od 1N, jer je boridni sloj vrlo krk, pa bi upotrebom viših opterećenja došlo do pucanja sloja.

Prema Panteliću [8], jedan od najtežih problema boriranja je njegov nepovoljan uticaj na dinamičku čvrstoću, što se smatra glavnom preprekom široj primeni ovog postupka u mašinstvu. U nastavku svog istraživanja, on zatim pominje istraživanje J. Dukarevića i M. Baltera koji su ispitivali uticaj boriranja na dinamičku čvrstoću uz razne termičke obrade posle boriranja. Iz njihovih rezultata je očigledno da naknadno poboljšavanje ima negativan uticaj na raspored unutrašnjih napona i na dinamičku čvrstoću. Postoji pretpostavka da je ovaj pad dinamičke čvrstoće posledica nastajanja finih pukotina u boriranom sloju.

Navodeći nedostatke postupka boriranja, u literaturi [10] saopšteno je da su, uopšteno, svojstva zamora usled kotrljanja boriranih delova od legiranog čelika veoma loša u poređenju sa cementiranim i nitriranim čelicima pri visokim kontaktnim opterećenjima (2000 N ili 450 lbf). Oni smatraju da je ova loša osobina razlog zašto je tretman boriranja zupčanika ograničen na one konstrukcije gde je transverzalno opterećenje zuba zupčanika svedeno na minimum.

2.3. Javljanje lateralnih pukotina, pora i cepanje boridnog sloja

Boridni slojevi na čelicima često imaju brojne pukotine koje dovode do cepanja. Utvrđeno je da se lateralne (bočne) pukotine javljaju na ili u okolini FeB/Fe₂B međusloja zbog drastične razlike u koeficijentu toplotnog širenja između FeB i Fe₂B boridnih faza. Kao što je prethodno navedeno, u poglavlju 2.1. ovog rada, Fe₂B i FeB slojevi formiraju se pod pritiscima i zateznim naprezanjima. Ove bočne pukotine često dovode do ljuštenja boridnog sloja kada se primeni mehaničko opterećenje. Pore se javljaju u FeB sloju. Gustina FeB sloja je manja u poređenju sa Fe₂B. Zbog problema krstosti i formiranja bočnih pukotina FeB/Fe₂B dvofazna mikrostruktura nije poželjna.

Pukotine imaju tendenciju da se formiraju posebno kod visokougleničnih čelika [15]. Nastojeći da istraži razloge nastanka pukotina u boridnim slojevima, Rile[16] je sproveo tretman boriranja u mešavini koja se sastojala od boraksa i borkarbida u atmosferi vodonika, nakon čega je u svom radu naveo da se u boridnim slojevima mogu izdvojiti tri vrste pukotina: pukotine paralelne sa površinom na FeB/Fe₂B međusloju; pukotine vertikalne na površinu niže od FeB/Fe₂B međusloja i pukotine

vertikalne na površinu do osnovnog metala. On zatim navodi da pukotine prvog i drugog tipa nastaju bez obzira na brzinu hlađenja nakon boriranja, a da se pukotine trećeg tipa javljaju, uglavnom, nakon brzog hlađenja boriranih delova. Kao glavni razlog za spontano nastajanje pukotina, on navodi visoka zaostala naprezanja u boridnom sloju. Zaostala naprezanja se moraju javiti na temperaturi boriranja. Međutim, na visokim temperaturama boriranja, osnovni metal ima nisku čvrstoću i plastično se deformiše pri malim naprezanjima. On u svom radu potvrđuje ranije sprovedena istraživanja i saopštava da, zbog razlike u koeficijentima ekspanzije, hlađenje nakon boriranja dovodi do zateznih naprezanja u FeB sloju i pritiskih naprezanja u Fe₂B sloju. Ako je procenat FeB u ukupnoj debljini sloja veliki, onda razlika u deformaciji može dovesti do pukotina na granici između dva borida (pukotine prve vrste, slika 4) i do određenog ljuštenja borida.

Ako prevlaka sadrži malu količinu FeB faze, ona je istegnuta, i tada se formiraju pukotine vertikalne na površinu (pukotine drugog tipa).

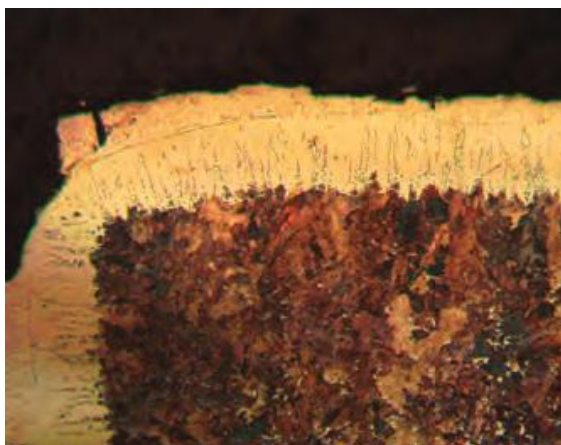


Slika 4. Pukotina paralelna sa površinom na FeB/Fe₂B međusloju. Pukotina prve vrste prema Rile[16]

Figure 4. Crack which is parallel with the surface at FeB/Fe₂B interface. Crack of first kind according to Rile[16]

Pukotine koje se protegnu vertikalno do površine i dostižu jezgro (treći tip) javljaju se, uglavnom, u slučaju kada se martenzitna transformacija javlja u osnovnom metalu na niskim temperaturama, praćena velikim povećanjem zapremine pri čemu se pritiska naprezanja u Fe₂B sloju menjaju u zatezna naprezanja (na primer, pri brzom hlađenju). U rezultatima svojih istraživanja, on dalje navodi da, u slučaju eliminisanja FeB sloja, gotovo da nema javljanja pukotina prvog i drugog tipa, a verovatnoća nastajanja pukotina trećeg tipa javlja se nakon brzog hlađenja.

Ljuštenje boridnog sloja, takođe, je uočeno kod nekih legiranih čelika sa veoma tankim slojevima Fe_2B . Prema njegovom mišljenju, razlog za to su vrlo visoka pritiska naprezanja. Sprovodeći opritne probe, zapazio je da zatezna naprezanja preovladavaju u Fe_2B sloju proizvedenom na $850^\circ C$, što dovodi do pukotina uprkos maloj debljini sloja. Zaostala pritiska naprezanja nastaju nakon boriranja na 1000 do $1100^\circ C$. U slučaju visokougleničnih i visokolegiranih čelika pritiska opterećenja su toliko velika da se prevlaka ljušti uprkos relativno malim debljinama prevlake. Prikaz otcepljenog FeB boridnog sloja na uglu dat je na slici 5.



Slika 5. Dvofazni boridni sloj na kojem su uočljivi pukotina i ljuštenje FeB sloja na uglu [11]

Figure 5. Dual-phase boride layer at which are observed crack and peeling of FeB layer at angle [11]

2.4. Negativni efekti visokih temperatura i ostali problemi strukture sloja

Temperatura boriranja je najvažniji faktor koji utiče na troškove procesa i na izbor supstance koja se borira [4]. Izbor optimalne temperature procesa u odnosu na naknadno kaljenje i otpuštanje jedan je od najvažnijih problema boriranja. Boriranje se vrši u različitim praškastim mešavinama, u hermetički zatvorenim kontejnerima ili u slanim kupatilima. To otežava direktno gašenje materijala koji se, posle procesa, mora ohladiti polako do sobne temperature, a nakon toga ponovo zagrejati do temperature austenitizacije što povećava rizik od neželjenog rasta zrna. Osim toga, mnogi materijali imaju temperaturu austenitizacije višu od temperature boriranja što stvara velika ograničenja u formiranju boridnih slojeva na njihovoj površini [17].

Iako boridni sloj na čeliku pokazuje visoku površinsku tvrdoću, uz dužinu boridne igle dolazi do velikog rasipanja u mikrotvrdoći usled anizotropne difuzije atoma bora tokom boriranja. Ova razlika možda ukazuje na veću nehomogenost

koncentracije bora i ostalih elemenata u boridnom sloju. Na taj način se sprečava efektivna upotreba boriranih delova kada su izloženi udarnim i visokim lokalnim opterećenjima tokom rada. Trebalo bi napomenuti da je rast, tj. povećanje zapremine, usled boriranja od 5% do 25% od debljine sloja (npr. sloj od $25\mu m$ ili $1000\mu m$ imao bi rast od $1,25$ do $6,25\mu m$ ili od 50 do $250\mu m$). Njegova veličina zavisi od sastava osnovnog materijala ali ostaje dosledna datoj kombinaciji materijala i ciklusa tretmana i može se predvideti za datu geometriju komada i tretman boriranja. Za tretman preciznijih komada, gde je dozvoljeno malo odstranjivanje dodataka, mora se obezbediti dovoljna količina od 20 do 25% povećanja dimenzija konačne debljine boridnog sloja.

3. PROBLEMI I OGRANIČENJA POSTUPAKA BORIRANJA

3.1. Opšta ocena pogodnosti procesa

Stvaranje ogromnih količina čvrstog otpada i gasovitih emisija postaju glavni problem poslednjih godina. Procesi boriranja nisu pogodni za masovnu proizvodnju zbog ograničene mogućnosti automatizacije. Tehnike boriranja su nefleksibilne i radno manje intenzivne čineći ovaj metod manje isplativim od drugih tretmana površinskog otvrdnjavanja, kao što su gasna cementacija i plazma nitriranje. Oba ova postupka imaju prednost u odnosu na boriranje, jer su fleksibilni sistemi, nude smanjene troškove rada i održavanja, zahtevaju kraća vremena obrade i relativno su jednostavni za upotrebu. Zbog toga je boriranje komplikovano i skupo posebno za velike i složene komponente.

3.2. Problemi boriranja u tečnom sredstvu

Ovaj postupak ima nekoliko nedostataka. Uklanjanje viška soli i neizreagovanog bora neophodno je nakon tretmana, pa ovaj korak može biti skup i dugotrajan. Da bi se postigla reproduktivnost boriranja nije dozvoljeno povećanje viskoznosti kupatila. To se postiže ponovnim punjenjem solju što podrazumeva visoke troškove održavanja, a u nekim slučajevima može biti potrebna i zaštita od korozivnih isparenja. Prema mišljenju Pantelića [8] postupak boriranja u tečnoj sredini još uvek nije dovoljno istražen. Rezultati boriranja u tečnom sredstvu nisu opštepotvrđeni. U svojim istraživanjima on navodi kako su ponovljene probe po navedenom receptu na Institutu za termičku obradu u Bremenu (Nemačka) dale samo oksidisanu površinu uzorka.

3.3. Problemi gasnog boriranja

Boriranje sa smešom $B_2H_6-H_2$ nije komercijalno održivo zbog visoke toksične i eksplozivne prirode diborana. Kada se koriste organska jedinjenja bora, istovremeno nastaju karbidni i boridni slojevi.

Budući da je BBr_3 skup i teško je rukovati sa njim (ima jake reakcije sa vodom) i zato što BF_3 zahteva visoku temperaturu redukcije (zbog veće stabilnosti) i proizvodi fluorovodonična isparenja, BCL_3 ostaje kao najatraktivniji izbor za gasno boriranje [10]. Walter Fichtl u svojoj studiji navodi da je diboran, glavno korišćeno jedinjenje, izuzetno toksičan. Niža granična vrednost toksičnosti za diboran je 0,1ppm, u poređenju sa dozvoljenom vrednosti od 10ppm za izuzetno opasan vodonik cijanid. Čak i kada je razblažen vodonikom, diboran je i dalje veoma skup.

3.4. Problemi plazma boriranja i boriranja u fluidnom ležištu

Istražujući tanke filmove i prevlake, Caruta B.M. [18] u istoimenoj knjizi navodi da su ozbiljni nedostaci plazma boriranja ekstremna toksičnost, eksplozivnost i visoka cena upotrebene atmosfere kao i korozija u vakuumskoj komori. Kao rezultat toga, proces nije komercijalno prihvaćen. Da bi se izbegli navedeni nedostaci, nedavno je razvijeno boriranje pastom u tinjajućem pražnjenju na temperaturi impregnisanja, a koja sadrži mešavinu 60% amornog bora i 40% tečnog boraksa, za koju je utvrđeno da značajno povećava formiranje površinskog boridnog sloja.

Najnovija inovacija je boriranje u fluidnim ležištima koje uključuje sloj materijala krupnozrnastih čestica silicijum karbida, poseban prah za boriranje kao što je Eka-bor WB i gas bez kiseonika kao što je N_2-H_2 mešavina. Kada se kao izvor toplote koristi električna struja, ležište služi kao brži medijum za prenos toplote. Prema saopštenju autora u literaturi [10] važan nedostatak leži u kontinuiranom ispiranju agensa boriranja inertnim gasom unutar retorte. Izduvni gasovi koji sadrže obogaćena jedinjenja fluora moraju se apsolutno očistiti, npr. u apsorberu napunjenom suvim $CaCO_3$ da bi se izbegli problemi sa životnom sredinom. Alternativno, pulsni fluidni proces može značajno smanjiti količinu izduvnih gasova.

3.5. Problemi boriranja u čvrstom sredstvu

Iako se boriranje u čvrstom sredstvu obično koristi u komercijalne svrhe, više temperature tretmana i njegovo duže trajanje predstavljaju nedostatke. Zbog male brzine boriranja i tankog boridnog sloja, proces se obično izvodi na visokoj temperaturi kako bi se ubrzao proces difuzije sa ciljem dobijanja željene debljine sloja. Ovi problemi dovode do niske efikasnosti proizvodnje i visokih troškova proizvodnje. Govoreći o pripremi predmeta za boriranje u čvrstom sredstvu, Pantelić [8] saopštava da je upotreba amornog bora nepogodna ne samo zbog visoke cene, već i zbog toga što se pomoću njega teško može postići zatvoreni

sloj borida. On istovremeno naglašava da čak i primena ferobora još uvek ima karakter ispitivanja, jer daje lošu strukturu boriranog sloja.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu, prikazan je objektivni pristup u istraživanju i sagledavanju problema i nedostataka koji se javljaju upotrebom postupaka boriranja u svrhu precizne procene adekvatnosti njegove primene u različitim uslovima eksploatacije. Prilikom izlaganja, naglašena je unificirana priroda pojavljivanja problema, stavljajući naglasak na njihovo zajedničko delovanje u narušavanju integriteta i postojanosti boridnih slojeva u teškim eksploatacionim uslovima. Istraživanjem je obuhvaćena većina problema i nedostataka koji su deo procesa boriranja ili koji nastaju tokom eksploatacionog veka nekog dela. Razumljivo je da u radu nije poklonjena pažnja svim poznatim problemima i defektima, ali je prikazan pregled najučestalijih problema čije je poznavanje od esencijalnog značaja kako bi radnici na profesionalan način odabrali i izvršili postupak boriranja.

Razmatranjem nedostataka i defekata u boridnim slojevima, zapaža se da je krtost borida najprisutniji problem u boriranim delovima koji uslovljava smanjenje performansi i životnog veka delova. U ovom delu rada je navedeno nekoliko naučnih studija koje su objasnile prirodu posledica krtosti i najuticajnije mehanizme razvoja krte strukture. Uočljivo je da se mehaničke osobine menjaju boriranjem, ali i naknadnom termičkom obradom, a studije pokazane u ovom delu rada pojasnile su ponašanje boriranih uzoraka u slučajevima izmenjenih mehaničkih osobina. Pregledom ograničenja postupaka boriranja, primećuje se da je izbor adekvatnog postupka složen problem usled egzistencije velikog broja ozbiljnih limitirajućih činilaca koji karakterišu svaki postupak. Zaštita zdravlja osoblja, uticaj na životnu sredinu, ekonomski efekti i trajanje održavanja jesu kriterijumi o kojima je potrebno diskutovati, ne samo prilikom izbora postupka boriranja, nego i prilikom izbora postupka difuzione obrade.

5. LITERATURA

- [1] A.Bartkowska, P.Jurči, D.Bartkowski, D.Przestacki, M.Hudáková (2017) Surface condition, microstructure and microhardness of boronized layers produced on Vanadis-6 steel after modification by diode laser, Arch.Mech.Tech.Mater. 37(1), 70-75
- [2] Ž.Stojanović, S.Stanisavljev (2013) Zaštita delova mašinskih sistema metodama višekomponentnog boriranja, Zaštita Materijala, 54(4), 381-388
- [3] Ž.Stojanović, S.Stanisavljev, S.Erić, M.Đurđev (2017) Povećanje efikasnosti alata za kovanje

- termodifuzionim boriranjem, *Zaštita Materijala*, 58(1), 22-31.
- [4] H.Çelikkan, M.K.Oztürk, H.Aydin, M.L.Aksu (2007) Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods, *Thin Solid Films*, 515(13), 5348-5352.
- [5] Ü.Er, B.Par (2004) II.Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, knjiga radova, p.207-212.
- [6] S.Ulker, I.Gunes, S.Taktak (2011) Investigation of tribological behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620, 52100 and 440C steels, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 18(5), 370-376.
- [7] M.M.Noor (2008) Boronizing Effects On Impact Toughness Of Low Alloy Tool Steel (http://eprints.utm.edu.my/6362/1/Boronizing_Effects_On_Impact_Toughness_Of_Low_Alloy_Tool_Steel_Mohd_Ridhuan_Bin_Mohd_Noor_TS695.3.M74_2008-24_Pages.pdf, (09.01.2019.).
- [8] I.Pantelić (1974) Tehnologija termičke obrade čelika - površinske termičke obrade, Univerzitet u Novom Sadu, FTN, Novi Sad.
- [9] O.A.Gomez-Vargas, J. Solis-Romero, U. Figueroa-Lopez (2016) Boronitriding coating on pure iron by powder-pack boriding and nitriding processes, *Materials Letters*, 176, 261-264.
- [10] T.Arai, G.M.Baker, C.E.Bates i grupa autora (1991) Boriding (Boronizing) of steels, knjiga ASM Handbook, Vol.4 Heat Treating, Izdavač ASM International, Ohio, 978-999.
- [11] Surface Heat Treat and Coatings, A concise review of Boronizing, <http://surface-heat.com/>
- [12] W.Fichtl (1981) Boronizing and its Practical Applications, *Materials & Design*, 2(6), 276-286.
- [13] S.Narueemon (2004) Surface Treatment of Ferrous Alloys with Boron, master teza, New Jersey Institute of Technology.
- [14] P.Topuz, E.Yilmaz, E.Gündoğdu İş, E. Gümüş (2014) The fracture toughness of Fe₂B formed on boronized AISI 304, *Materialprufung*, 56(9), 690-693.
- [15] P.Jurči, M.Hudáková (2009) 18. mezinárodní konference metalurgie a materiálů, Hradec nad Moravicí, Slezská Ostrava, Czech Republic, knjiga radova.
- [16] M.Rile (1974) Reasons for the formation of cracks in boride coatings on steel, *Metal Science and Heat Treatment*, 16(10), 836-839.
- [17] F.Richards (2014) HTPRO Business and Technology for the Heat Treating Professional, p. 35-47.
- [18] B.M.Caruta (2005) Thin Films and Coatings: New Research, Nova Science Publishers, New York.

ABSTRACT

OVERVIEW OF DIFFUSION BORIDING PROBLEMS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS

In this paper is systematized a review of the problem which occur during the execution of the boriding process, and which by its occurrence limit its wider and versatile industrial application. The paper focuses on all defects that undermine the integrity of the boride layer and which affect on the reduction of its safety in severe exploitation conditions. The research was directed towards the display of limitations and inadequacy of boriding procedures in a solid, liquid and gaseous medium in terms of their contribution to low production efficiency and unjustifiably high production costs. The adverse effects of brittleness and formation of cracks that lead to fracture and peeling of the boride layer were considered, the problems of choosing high process temperatures which can be harmful for the base material, but also other errors which to be avoided in order to achieve the optimum characteristics of the boride layers. Remaining in this context, special attention was paid to the frequent factors that have the greatest impact on the deterioration of the mechanical properties of boride layers, especially dynamic strength and toughness.

Keywords: boronizing, brittleness, cracks, toughness, temperature.

Review paper

Paper received: 31. 01. 2019.

Paper accepted: 25. 04. 2019.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal