

## Razvoj i primena postupka boriranja u funkciji produženja radnog veka mašinskih delova

*Autori su u radu pokušali da sistematizuju znanja i prikažu važnost upotrebe boriranja kao termodifuzionog postupka na uvećanje veka trajanja mašinskih elemenata, u zavisnosti od konstrukcije, odnosno tipa i radnih uslova. U radu su opisane osnovne zakonitosti za postupak boriranja koji se primenjuje prvenstveno u cilju povećanja otpornosti prema abrazivnom mehanizmu trošenja. Pored napred navedenog, autori su ukazali na sadašnje stanje i perspektive razvoja postupka boriranja, navodeći pri tom karakteristične primere njegove primene na sadašnjem nivou znanja. Autori su takođe ukazali na veliku razliku između naučnog istraživanja i industrijske prakse, što je posebno izraženo u inostranstvu, gde se radi toga organizovano podupiru i iniciraju projekti dopunskog obrazovanja o razvoju inženjerstva površina. Time se podupire primena, ne samo boriranja, već i ostalih postupaka modifikovanja, čijom se upotrebom postižu višestruka povećanja postojanosti i trajnosti metalnih mašinskih elemenata, što doprinosi značajnom povećanju kvaliteta tretiranog dela i ekonomičnosti proizvodnje.*

*Dobijeni rezultati ukazuju na celishodnost proizvodnje boriranih elemenata, koji nisu jako dinamički napregnuti i koji tokom rada ne trpe naprezanje na istezanje, za primenu u uslovima koji zahtevaju ekstremnu otpornost na habanje.*

**Ključne reči:** boriranje, poboljšanje performansi, habanje, korozija, prelazni metali

### 1. UVOD

Svojstva površinskih slojeva mašinskih delova i alata veoma često određuju njihovu vrednost jer ona presudno utiču na trajnost u eksploataciji a time i na ekonomičnost primene. Iz tog se razloga posvećuje sve veća pažnja inženjerstvu površina i tehnologijama površina. U industrijski razvijenim zemljama se u poslednje vreme tehnologije površina označavaju kao ključne tehnologije jer njihovom primenom uveliko zavisi kvalitet proizvoda. Razvoj tehnologija inženjerstva površina je veoma intenzivan i povezan je s razvojem tehnike na mnogim osnovnim područjima nauke i tehnologije.

Radi brzog razvoja, povećava se jaz između naučnog istraživanja i razvoja prema primeni u industriji. Posebno mala preduzeća, u kojima ne postoje razvojni sektori, teško mogu pratiti tako intenzivan razvoj. Svesni te činjenice, industrijski razvijene zemlje Evropske unije organizovano podupiru prenos znanja na području primene novih tehnologija inženjerstva površina. U tim se zemljama od strane vlade sprovode potpomognuti programi dopunskog obrazovanja o novostima na području inženjerstva površina. Organizuju se kratki seminari i kursevi za obrazovanje zaposlenih koji su uključeni u proizvodni lanac (konstruktori, tehnolozi i neposredni radnici) za proizvodnju u kojoj nova znanja na području inženjerstva površina mogu doprineti kvalitetu i ekonomičnosti poslovanja.

Adresa autora: Tehnički fakultet »Mihailo Pupin«, Zrenjanin, Đure Đakovića bb  
Rad primljen: 10. 07. 2011.

Oblaganje borskom gasovitom difuzijom ili boriranje (engl. *Boronizing/Boriding*) je proces hemijskog depoziционog isparenja pri visokim temperaturama, prilikom čega atomi bora difunduju u osnovu metala komponenta da stvaraju novu metaluršku leguru na površini. Legura je tako integralni deo bazičnog metala. Oni poseduju vrlo izražene osobine i nova površina legure dostiže vrlo visoku tvrdoću. Ova ojačana površina je ta koja rezultira dramatično unapređenje upotrebnoг veka te komponente. Dubina dobijenog borskog sloja određena je temperaturom, dužinom trajanja tretmana i materijalom. Dubina boridnog sloja iznosi od nekoliko desetina [ $\mu\text{m}$ ] pa do 0,3 [mm]. Borski omotači-slojevi mogu da se koriste vrlo efikasno kada delovi treba da izdrže abrazivno habanje.

Borirani slojevi na mašinskim elementima i na delovima imaju niži koeficijent trenja i višestruko dužu trajnost (od 3 do 4 puta) nego ne borirani delovi.

**Cilj ovog rada** je da opiše trenutno stanje termodifuzionog postupka boriranja, koji se primenjuje u inženjerstvu površina radi poboljšanja performansi mašinskih delova, sa ciljem proizvodnje fabrikata visokog kvaliteta.

### 2. RAZVOJNI RAD U OBLASTI PRIMENE

Ideja za korišćenje ovog postupka je stara (*H. Moissan*, 1895. godine), ali se tek u novije vreme na ovoj metodi vrlo mnogo radi, naročito u Rusiji, gde ovaj postupak ima i najveću primenu, bar prema onome što je objavljeno. Teorijske osnove ovoga procesa

vrlo su malo proučene. U zapadnim zemljama je ovaj postupak najčešće zaštićen patentima (Francuska 1956., USA 1949., Engleska 1951. itd.), uglavnom o boriranju preciznih delova ili alata. Dok je u zapadnoevropskoj literaturi objavljeno vrlo malo radova, u Rusiji je, naročito u poslednjih osamdeset godina, objavljen veliki broj radova. Prema *H. Kunst*-u i *O. Schaaber*-u (VDI-Z, 1965, sv. 2, str. 49) i pored odličnih osobina boriranog sloja, primena u tehnici mu je suviše mala, što je posledica sledećih razloga:

- boriranje je nov postupak koji još nije dovoljno poznat,
- kod obavljanja praktičnih proba nastaju neke teškoće o kojima niko ne saopštava ili se, pak,
- boriranje primenjuje kod takvih delova o kojima se iz bilo kojih razloga ne daje javno saopštenje.

Određeni postupci termo-hemijske obrade imaju sve veću primenu u praksi i u našim proizvodnim pogonima, kao uobičajeni postupci obrade. Međutim, neke metode još uvek nisu našle široku primenu u praksi. Takav je slučaj sa boriranjem.

Boriranje se primenjuje u određenim uslovima kada se želi povećati otpornost prema trošenju (erozivnom, adhezivnom i abrazivnom). Za određene eksploatacione uslove moguće je, definisanjem parametara, postupka i načina boriranja, dobiti tražena svojstva. U nekim slučajevima, boriranjem srednjelegiriranog čelika moguće je zameniti visokolegirani čelik (na primer boriranjem čelika Č 6444 uspešno se može zameniti visokolegirani alatni čelik za hladni rad).

Prvo boriranje u Rusiji primenjeno je kod delova izloženih abraziji u naftnoj industriji (delovi muljnih pumpi, alata za bušenje, itd.). U poslednje vreme mnogo se radi na primeni boriranja kod alata za obradu plastičnim deformisanjem, alata od brzoreznog čelika, kod dugih pužastih osovin, kao i kod raznih delova u industriji traktora i motora. Zatim, kao primeri boriranih delova, mogu se navesti još i trnovi i žigovi za duboko izvlačenje, delovi menjača, valjci za graviranje, delovi za oblikovanje betona, kalupi za kovanje, mlaznice za livenje, delovi ventila, osovinice traktorskih gusenica i čelične N80 naftne cevi.

Pri boriranju, hemijski sastav elementa bora će ispariti i reagovati sa čelikom i sa drugim legurama da bi se pretvorio u difuzni sloj delova, na ekstremno čvrstom sastavu koji ima superiornu otpornost na habanje [10]. Delovi se boriraju u retorti zagrevanjem u peći i korišćenjem kontrolisane atmosfere koja sadrži komponente bora na temperaturama od 800 do 1000 [°C]. Delovi zagrejani do temperatura u opsegu od 1800 [°F] (982,2 [°C]), tokom nekoliko sati, mogu odmah posle tretmana boriranja da se stave u upo-

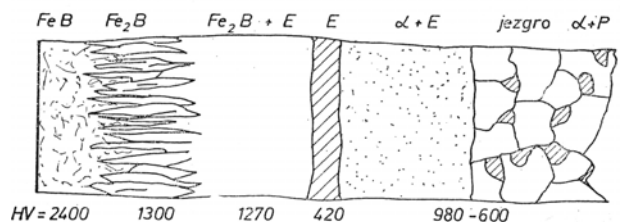
trebu koja zahteva ekstremno visoku otpornost na habanje. Izuzetno povećanje otpornosti na habanje zasnovano je na stvaranju borida železa u površinskom sloju čelika.

### 3. SVOJSTVA BORIRANIH DELOVA

Za metale i legure kod kojih se ne postavljaju uslovi visoke žilavosti i udarnih opterećenja, već se traže specijalne površinske osobine kao što su abrazivna i koroziona postojanost, vatrostalnost kao i povećanje površinske tvrdoće može se primeniti hemijsko-termička obrada-boriranje.

Osnovni efekat koji se postiže boriranjem je povećanje otpornosti na habanje, što je posledica velike *tvrdće* boridnog sloja. U pogledu visine tvrdoće koja se može postići boriranjem podaci su različiti, a ima ih koji navode i tvrdoće od HV=3000 [kp/mm<sup>2</sup>]. Međutim, najčešće izmerene vrednosti su između 1700 i 1900 [kp/mm<sup>2</sup>]. Kod legiranih konstrukcionih čelika sa 0.38 i 0.42 [%] ugljenika *L. G. Voroshnin* i *L. S. Lyakhovich* su (*Izvestija VUZ-černaja metalurgija*, 1968, sv. 8, str. 121) izmerili tvrdoće boriranog sloja od HV 1800 do HV 2300 [kp/mm<sup>2</sup>]. Isti autori su ispitivali zavisnost tvrdoća boriranog sloja od temperature i trajanja boriranja, kao i od vrste i količine legirajućih elemenata. Kod čelika sa *Ni, Mn, Cu, Al*, kao i ugljeničnih, sa povišenjem temperature boriranja tvrdoća nešto opada, a kod čelika sa *Mo* i *W* raste. Vreme boriranja praktično nema uticaja na tvrdoću.

Pored tvrdoće boriranog sloja, na otpornost na habanje utiču i mikrotvrdoće faza koje obrazuju boridni sloj (*FeB, Fe<sub>2</sub>B* i faza  $\alpha$ ). *M. Balter* sa saradnicima odredio je (MiTOM, 1964, sv. 12, str. 39) strukturu boriranog sloja kod konstrukcionih čelika i merio mikrotvrdoću pojedinih komponenti strukture (pogledati sliku 1).



Slika 1 - Šematski prikaz tvrdće i strukture boridnog sloja [8]

Sa slike 1 uočljivo je da tvrdoće boridnih slojeva iznose oko 2000 HV. Iz karakteristika boridnih slojeva proizlazi da treba izbegavati istovremeno pojavljivanje oba tipa borida u sloju (različiti koeficijenti toplotne dilatacije, pojava velikih zaostalnih napreznja) koje može uzrokovati pukotina između slojeva i odvajanje sloja *FeB*. Nakon boriranja delovi se mogu naknadno zakaliti pri čemu se ne sme koristiti "oštro"

sredstvo za hlađenje zbog mogućeg pucanja boridnog sloja.

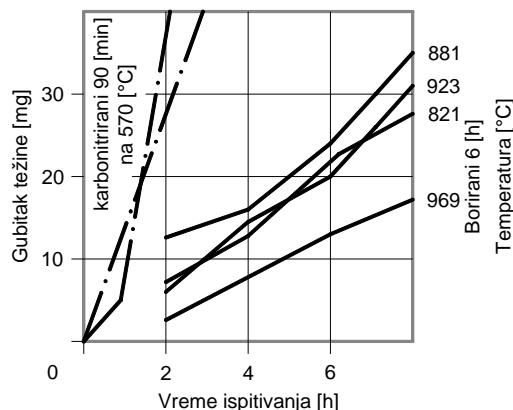
Urađene su mnoge studije dobijanja boridnih slojeva, mehanizama boriranja, faza boridnih slojeva i njihovih karakteristika na sobnoj temperaturi. Sprovedeno je nekoliko naučnih istraživanja ponašanja boridnih slojeva na visokim temperaturama. Mada je utvrđeno da se  $FeB$  faza mogla transformisati u  $Fe_2B$  fazu kroz termičku obradu na visokim temperaturama, nije objavljeno više detalja i mehanizama transformacije boridnih slojeva. Mi čak ni ne znamo kako je stanje/oblik borida na visokim temperaturama. Međutim, dobro je poznato da se procesi boriranja obično sprovode u sredinama sa visokim temperaturama, pa je neophodno proučiti visoko-temperaturno ponašanje boridnih slojeva u cilju dobijanja detaljnih informacija o mehanizmu boriranja. Štaviše, veliki broj boriranih radnih predmeta koriste se u sredinama sa visokim temperaturama, za koje je takođe potrebno znati visoko-temperaturno ponašanje slojeva.

Merenja tvrdoće u rasponu od sobne temperature do 1100 [°C], pokazuju da vrednosti tvrdoće boridnog sloja i osnovnog metala variraju sa temperaturom. Primećeno je da tvrdoća boridnog sloja i osnovnog metala opada sa temperaturom.

Novija naučna istraživanja o temperaturnoj postojanosti boridnih slojeva, sprovedena na čelicima 45 # pokazuju da tvrdoće boridnih slojeva imaju visoku vrednost HV 1858 na sobnoj temperaturi, koja je daleko veća od tvrdoće osnovnog metala. Boridni sloj još uvek sadrži relativno visoke vrednosti tvrdoće od HV 605 na temperaturi koja dostiže 600 [°C]. Tvrdoće boridnih slojeva opadaju na nisku vrednost od HV 350 na temperaturi od 700 [°C]. Ali vrednost tvrdoće je i dalje veća od vrednosti tvrdoće osnovnog metala. Tvrdoća boridnih slojeva je samo HV 110 na temperaturama od 900 [°C]. To znači da boridni slojevi u potpunosti gube visoku tvrdoću na temperaturama od 900 [°C].

Tvrdoća boriranih delova meri se metodom VICKERS ili KNOOP na površini i na poprečnom preseku ispitnih uzoraka koji su prethodno metalografski pripremljeni (u poliranom stanju). Kod ispitivanja se primenjuju mala opterećenja jer je boridni sloj vrlo krt pa bi upotrebom viših opterećenja došlo do njegovog pucanja. Ispitivanje tvrdoće provodi se opterećenjima od 1 N do 2 N (npr. HV<sub>0,1</sub>; HV<sub>0,2</sub> ili HK<sub>01</sub>; HK<sub>02</sub>).

Posledica visoke tvrdoće i njene postojanosti na povišenim temperaturama, a prema nekim autorima i u sredinama koje nagrizaju, jeste velika otpornost na habanje. Ovo se može uporedno proceniti prema karbonitriranju na slici 2, gde su dati rezultati uporednog laboratorijskog ispitivanja na habanje.



Slika 2 - Poređenje habanja boriranog i karbonitriranog uzorka [6]

Ova otpornost na habanje potvrđena je i u eksploatacionim uslovima. Ali, sasvim je sigurno da su za pravilnu primenu kod delova izloženih habanju neophodna dalja istraživanja.

Problem krtosti boriranog sloja, takođe je nerazrešen. Prema nekim autorima (*H. Kunst* i *O. Schaaber*), 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.

Nedavno je naučnik *Gopalakrishnan* sa saradnicima pokazao da ako se proces boriranja obavlja uz periodične prekide, proizvodi se promena morfologije tipične boridne igle i dobija se poboljšanje nekih mehaničkih svojstava (žilavosti i duktilnosti).

Da bi smanjili krtost dvofaznog boridnog sloja, istraživano je nekoliko vrsta tretmana pre ili posle boriranja, i to: cementacija, tretman laserom, brzo hlađenje (kvenčovanje), implantacija jona i gasno nitriranje. Boriranjem cementiranog čelika, preko predmeta je dobijeno smanjenje gradijenta mikrotvrdoće. U tretmanu laserom, gruba i stubična struktura boridnog sloja mogla se promeniti u fino-zrnastu strukturu. Brzim hlađenjem, gradijent tvrdoće između boridnog sloja i substrata mogao bi biti smanjen. U implantaciji N jona, poremećen je deo  $FeB$  i  $Fe_2B$  faza tako da su formirani slojevi:  $c-BN$ ,  $FeN$  i  $Fe_{2,3}N$ . U gasnom nitriranju, spoljašnji podsloj  $FeB$  može biti transformisan u duktilnu  $Fe_4N$  fazu, dok unutrašnji podsloj  $Fe_2B$  može biti transformisan u  $Fe_4N$  i  $B_{25}N$  faze.

U većini gore pomenutih istraživanja, agens boriranja je bio  $B_4C$  (drugi agensi su  $BCl_3$  i ferobor). Zbog problema vezanih za pucanje boridnog sloja, izgleda da se savetuje proučavanje mogućnosti korišćenja drugog agensa boriranja koji stvara nizak potencijal boriranja, u cilju formiranja samo  $Fe_2B$  faze površinskog sloja borida.

U kasnijim eksperimentima korišćen je boraks kao agens boriranja i ocenjivana je otpornost prema abrazivnom habanju ugljeničnih i niskolegiranih čelika, termički tretiranih pomoću ovog agensa. Rezultati su pokazali da čelici 1020, 1045, 4140 i 4340 mogu biti uspešno borirani u mešavini boraksa i silicijum karbida na 1000 [°C]. Rezultat boridnog sloja je bio monofazni  $Fe_2B$  sloj. Pri tome je maksimalna vrednost mikrotvrdoće boridnog sloja za ove čelike bila veća od 2000  $HV_{0,1}$ . Među svim čelicima, borirani čelik 1020 pokazao je najbolju otpornost prema abrazivnom habanju.

Boriranje ima različiti uticaj na statičku čvrstoću. Zatezna čvrstoća opada sa boriranjem, a pritiska čvrstoća raste sa porastom dubine boriranog sloja do jedne maksimalne vrednosti, pa zatim ponovo opada. Savojna čvrstoća i granica  $\sigma_{0,2}$  rastu najpre brzo sa porastom dubine sloja, a zatim sporije. Žilavost boriranog komada opada vrlo malo, itd. Jedan od najtežih problema boriranja je njegov nepovoljan uticaj na dinamičku čvrstoću, što se smatra glavnom preprekom široj primeni ovog postupka u mašinstvu.

#### 4. PRIMENA POSTUPKA NA PRELAZNYM METALIMA

Borirane površine čelika uspešno se primenjuju već dugi niz godina. Međutim, u poslednjoj deceniji, ova tehnologija je proširena i na prelazne metale, gde je prostor za istraživanje ogroman. Boridi prelaznih metala imaju veliki broj korisnih hemijskih i fizičkih svojstava koji ih čine važnim materijalima sa istraživačke tačke gledišta. Među ovim karakteristikama su otpornost na habanje, visoka mehanička čvrstoća, visoka temperatura topljenja, otpornost na koroziju u kiselinama, itd. Oni se koriste za visoke temperature kao što su retorte, kalupi za livenje, u avio industriji, itd.

Boridni slojevi na železnim materijalima imaju odličnu kombinaciju svojstava, otpornosti na koroziju i habanje. Boridni slojevi na materijalima čija osnova nije železo su poznati zbog njihove visoke tvrdoće, uključujući habajuća i korozivna svojstva. Titanijum i njegove legure, posebno privlače značajnu pažnju zbog svoje potencijalne upotrebe kao konstrukcioni materijali niske gustine i visoke temperature topljenja. Otpornost titanijuma i njegovih legura prema oksidaciji na visokim temperaturama može se poboljšati postupkom boriranja.

Nikl i njegove legure su poznate po njihovoj upotrebi kao materijali otporni na koroziju pri povišenim temperaturama. Međutim oni nemaju otpornost na habanje, koja se može poboljšati postupkom bori-

ranja. Slično tome, tantal i niobijum imaju traženi potencijal kao materijali za implantate u biomedicinskoj industriji. Njihova mehanička čvrstoća se može poboljšati boriranjem.

Ovaj proces treba da bude izveden na višoj temperaturi za materijale čija je osnova železo. Tipične temperature boriranja za prelazne metale kreću se između 900 [°C] i 1400 [°C]. Za razliku od železnih materijala, gde se boridi pojavljuju kao igličasti kristali, kod materijala čija osnova nije železo, boridni sloj izgleda više kao stubična struktura. Igličasti kristali ili stubične strukture pomažu poboljšanju prijanjanja između sloja i osnovnog metala.

Što se tiče prelaznog metala, tantala, najnovijim eksperimentalnim istraživanjima dobio se jedinstveni sloj sa stubičnom strukturom od 3 [ $\mu$ m] dubine. Tokom istraživanja kinetike, uočeno je da je dubina sloja povećana eksponencijalno sa temperaturom i parabolno je povećana sa vremenom. Dobijeni rezultati ukazuju da je polarizacioni otpor tantala povećan  $8 \times$  u 4 [%]  $NaCl$ , tako da se može zaključiti da je brzina korozije tantala smanjena za gotovo  $8 \times$  [10].

Za razliku od tantala, mnogo dublji sloj od 10 [ $\mu$ m] dobijen je na niobijumu, koji pokazuje stubičnu strukturu borida. Mikrotvrdoća sloja je 3200 HK, što je gotovo  $10 \times$  više od osnovnog metala. Nakon boriranja polarizacioni otpor niobijuma je povećan  $9 \times$ . Ovim se može zaključiti da je  $9 \times$  smanjena brzina korozije niobijuma [10].

Ravnomeran sloj dubok 11 [ $\mu$ m] dobijen je na volframu, uz mikrotvrdoću sloja od 3200 HK. Polarizacioni otpor volframa u 4 [%]  $NaCl$  povećan je  $2 \times$  nakon boriranja [10].

Dalja istraživanja su potrebna da bi se identifikovale razlike u fazama koje su prisutne u sloju [10].

#### 5. ANALIZA OBRAĐENIH PODATAKA

Boriranje je postupak toplotno-hemijske obrade čelika na koji utiče veliki broj različitih faktora. Među najuticajnije faktore na postupak boriranja spadaju: temperatura boriranja, vreme držanja na temperaturi boriranja te vrsta čelika odnosno njegov hemijski sastav. Kako se boriranjem čelika postižu na površini izratka boridni slojevi koji imaju tvrdoću 5 i više puta višu od tvrdoće samoga čelika, to će u slučajevima abrazivnog mehanizma trošenja sigurno biti opravdano primeniti ovaj postupak u svrhu produženja veka trajanja izratka [4].

Na osnovu obrađenih podataka, možemo dakle videti, da površina često igra ključnu ulogu u određivanju veka trajanja; građevinskih elemenata koriš-

ćenih u mašinogradnji, postrojenja i inženjerskih aparata. Reč je dakle o svim površinama koje su napadnute od strane okolnih efekata, od kojih su najozbiljnije korozija i habanje.

Ekonomija trpi ogromne gubitke svake godine, zbog korozije i habanja i naponi da se zaštiti površina protiv ovih oblika napada zato su srazmerno veliki. Razvoj konstrukcionih materijala otpornih na habanje bio je logičan odgovor u borbi protiv habanja. Iako je ovaj pristup bio veoma uspešan, ograničenja su postavljena od strane ekonomskih i tehničkih faktora. Napori koje razvijene zemlje čine, radi smanjenja utroška energije i materijala, kao i za smanjenje ekoloških problema, ne mogu da dovedu do većih rezultata bez dodatnih istraživanja u svim oblastima tribologije. Najveće uštede moguće je ostvariti smanjenjem troškova održavanja i zamenom pohabanih delova (Ivković i Rac, 1995), (Aberšek i Flašker, 2005), (Veinović, 1991).

Budući da je habanje fenomen koji se javlja direktno na površini dela, očigledno rešenje je da se površina modifikuje i učini otpornom na habanje. Ovo predstavlja „rođenje“ oblasti koja se bavi površinskom obradom, koja služi isključivo pružanju zaštite od habanja. Ekstremno tvrde površine i otporne na habanje ostvarene su pomoću primene premaza ili difuzije u određenim mašinskim elementima.

Boriranjem čelika postiže se povećanje površinske tvrdoće i otpornosti na habanje. Mehaničke osobine menjaju se boriranjem. Pored opadanja zatezne čvrstoće, jedan od osnovnih problema jeste nepovoljan uticaj boriranja na dinamičku čvrstoću. Imajući u vidu i krtost borida  $Fe_2B$ , uz činjenicu da je legirajući elementi  $Cr$ ,  $Mo$  i  $W$  povećavaju, uspešno izvođenje procesa boriranja u smislu nastajanja odgovarajućeg sloja, zahteva punu pažnju.

Zato se u procesu boriranja teži formiranju strukture sloja koja sadrži samo  $Fe_2B$  sa širom zonom  $\alpha$  faze i sa potpunom testerastom vezom. Međutim, karakteristično je da se boridni slojevi ne mogu naprezati na istezanje, te u tom smislu, boriranje komada koji u radnim uslovima trpe naprezanje na istezanje nije opravdano. Tvrdoća borida je vrlo visoka i na ovoj činjenici zasnovana je visoka otpornost na habanje boriranog sloja.

U slučaju prelaznih metala, mnoge osobine kao što su mehanička čvrstoća, otpornost na habanje i otpornost na koroziju pri visokim temperaturama mogu se poboljšati boriranjem.

Tehnika je radno manje intenzivna, što čini ovaj metod manje isplativim u odnosu na druge procese termo-hemijske obrade. Delimično uklanjanje borid-

nog sloja, što zahtevaju uslovi tolerancija, moguće je samo uz naknadno brušenje dijamantom, jer konvencionalno brušenje izaziva pucanje sloja.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom poglavlju rada učinjen je pokušaj da se proceni značaj sprovedene analize i da se pronade odgovarajuće mesto predočenih rešenja u okviru šireg pogleda na oblast termodifuzionog postupka boriranja.

U ovom radu autori daju kritički osvrt na raspoložive podatke i sumiraju znanje iz oblasti inženjerstva površina. Objektivno sprovedeno istraživanje i analiza podataka u ovom radu pokazalo je osnovne zakonitosti i postavke, mogućnosti i ograničenja postupka boriranja.

Istraživanje je pokazalo da je ideja za povećanjem otpornosti na trošenje i hemijske postojanosti, uvođenjem u površinski sloj legirajućeg elementa bora, nastala u težnji da se štedi u skupim visoko legiranim čelicima. Istraživanje je takođe pokazalo da je pravilan izbor materijala i načina površinskog ojačavanja boriranjem, u smislu izbora adekvatnih komponenti procesa za neki konkretan deo, složen problem, a u svakom slučaju ima opšti cilj da se postigne poboljšanje, direktno ili kompromisno, onih osobina koje limitiraju (ograničavaju) vek trajanja dela.

Jednoznačna uputstva u ovom smislu bi bila od velike važnosti za konstruktora, ali na žalost u sistematskom obliku takvih uputstava nema u dovoljnom obimu.

O ovim problemima je objavljeno vrlo mnogo naučno-stručnih radova, koji se odnose najčešće na laboratorijska ispitivanja (na epruvetama za dinamičku čvrstoću ili uzorcima za univerzalne mašine za ispitivanje na habanje) od kojih se ponašanje delova u stvarnom pogonu može jako razlikovati. U rešavanju novih problema treba polaziti od takvih iskustava ali treba imati u vidu da tek u pogonskim istraživanjima počinje pravo rešavanje problema.

## LITERATURA

- [1] Landek, D., Cajner, F., Toplinska obrada i površinska zaštita-toplinska obrada, podloge za vježbe, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2009/10.
- [2] Landek, D., Tehnologija II, proizvodne tehnologije II-toplinska obrada, postupci toplinske obrade čitavog volumena, podloge za vježbu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2009./10.

- [3] Landek, D., Svojstva čelika obrađenih toplinsko-ke-mijskim postupcima, 11 vježba, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2010./11.
- [4] Matijević, B., Toplinsko-difuzijski proces boriranja čelika, Magistarska teza, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 1992.
- [5] M. A. Béjar, E. Moreno, Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, Department of Mechanical Engineering, University of Chile, Casilla 2777, Santiago 6511265, Chile.
- [6] Pantelić, I., Tehnologija termičke obrade čelika 2-površinske termičke obrade, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1974.
- [7] P. H. Yan, X. M. Zhang, J. W. Xu, Z. G. Wu, Q. M. Song, High-temperature behavior of the boride layer of 45 # carbon steel, Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, PR China, 2000.
- [8] Stanković, V., Nikolić, D., Mašinski materijali sa termičkom obradom II deo, Viša tehnička škola u Novom Sadu, Novi Sad, 1989.
- [9] Stupnišek, M., Matijević, B., Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala, Zbornik radova Znanstveno stručnog skupa s međunarodnim učešćem „Toplinska obradba metala i inženjerstvo površina“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [10] Vangaveti, R., Boron induced surface modification of transition metals, Master of Science Thesis in Materials Science and Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, 2006.
- [11] [www.metlabheattreat.com](http://www.metlabheattreat.com)

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT AND APPLICATION PROCEDURE BORONIZING IN THE EXTENSION OF WORKING LIFE MACHINE PARTS

*The authors attempted to systematize knowledges and show the importance of using the boronizing procedure as thermal diffusion procedure to increase the life of machine elements, depending on the construction and type and operating conditions. This paper describes the basic principles for the process boronizing which is used primarily to increase the resistance to abrasive wear mechanism. In addition to the above, the authors pointed to the current state and development perspectives of the proceedings boronizing, citing the specific examples of its application at the current level of knowledge. The authors also noted the big difference between scientific research and industrial practice, which is especially distincted overseas, where, because of that, projects of secondary education are supported and initiated the development of surface engineering. This supports not only the application of boronizing, but other processes of modification, which use achieved a multiple increase stability and durability of metal machine elements, which contributes to a significant increase in quality treated part and economic production.*

*The results indicate the expediency of production boronizing elements, which are not very dynamic strain and which during operation do not suffer strain at break, for use in conditions which require extreme resistance to wear.*

**Key words:** boronizing, improving performance, wear, corrosion, transition metals