

Željko Stojanović<sup>1\*</sup>, Sanja Stanisavljević<sup>2</sup>,  
Spasoje Erić<sup>3</sup>, Mića Đurđević<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Šinvoz d.o.o., Zrenjanin, <sup>2</sup>Tehnički fakultet „M. Pupin“, Zrenjanin,  
<sup>3</sup>Visoka tehnička škola strukovnih studija, Zrenjanin, <sup>4</sup>Univerzitet u  
Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Pregledni rad

ISSN 03519465, EISSN 24662585

UDC:620.197.6:621.73.013.3

doi:10.5937/ZasMat1701022S



Zastita Materijala 58 (1)

22 - 29 (2017)

## Povećanje efikasnosti alata za kovanje termodifuzionim boriranjem

### IZVOD

U radu je dat pregled literaturnih podataka o istraživanjima uticaja termodifuzionog boriranja na povećanje radnog veka i kvaliteta alata za obradu kovanjem. Radni vek alata uglavnom zavisi od površine materijala, te je važno da površina ima osobine kao što su korozivna otpornost, otpornost prema habanju i otpornost prema oksidaciji. U cilju poboljšanja površinskih osobina, primenjuju se neke površinske obrade sa ciljem zaštite površine i poboljšanja performansi materijala. Radni vek čeličnih kalupa za obradu oblikovanjem, koji je ograničen habanjem, može biti povećan različitim površinskim obradama u kojima se površinski sloj legira sa azotom, ugljenikom ili borom. Ove difuzione prevlake se sastoje u difuziji metala ili nemetala u osnovnom materijalu na visokim temperaturama. Tragajući za alternativom konvencionalnim metodama, autori su došli do saznanja da iskustva u boriranju širokog spektra alata za obradu kovanjem pokazuju da je radna stabilnost delova, podvrgnutih ovom postupku, povećana od dva do deset puta.

**Ključne reči:** boriranje, kalup za kovanje, kvalitet, vek trajanja.

### 1. UVOD

Kvalitet i vek trajanja alata i kalupa je važan faktor u proizvodnji, posebno u velikoserijskoj i sofisticiranoj proizvodnji. Tokom velikog broja godina, ulagani su značajni naponi u pokušajima da se poveća otpornost na habanje i radni vek korišćenjem različitih tehnoloških postupaka. Bilo je pokušaja u pravcu primene kvalitetnijih materijala i adekvatne termičke obrade i u pravcu primene različitih postupaka modifikovanja i prevlačenja površina u cilju povećanja trajnosti [1]. U poslednjih nekoliko godina, glavni fokus na poboljšanju triboloških svojstava alata za obradu plastičnom deformacijom (oblikovanjem) bio je na modifikovanju površine alata, uključujući nove čelike za alate za oblikovanje, na poboljšanju završne obrade površina i na površinskim obradama i slojevima.

Površine alata, kalupa i većine mašinskih delova često su izložene visokim naprezanjima, habajućim i korozivnim oštećenjima. U takvim uslovima rada, svojstva površina su, često, najvažnija za pouzdan i dug ekonomični vek trajanja. U cilju smanjenja ovih gubitaka trebalo bi poboljšati svojstva

površina. Difuzija atoma različitih elemenata u površinu materijala je često korišćena tehnika za poboljšanje svojstava površina alata i mašinskih delova [2]. Ove obrade ne rezultiraju samo modifikacijom hemijskog sastava površine, već, takođe, na osnovnom materijalu mogu biti formirane nove faze. Među tim tretmanima površinskog otvrdnjavanja, boriranje je veoma efektivan metod za povećanje površinske tvrdoće, otpornosti na habanje, otpornosti na koroziju i otpornosti prema visokotemperaturnoj oksidaciji [2]. Analiza povećanja veka trajanja kalupa za oblikovanje proizvod je dugotrajnih naučnih ispitivanja različitih konstrukcija u stvarnim ili laboratorijskim uslovima rada. Boriranje alatnog čelika je predmet naučnih interesovanja tokom mnogih godina, zbog napora da se razviju i optimizuju površinske tehnike ovih materijala [3].

Motivisani tim problemom, mi ćemo u ovom radu pokušati da procenimo značaj i relevantnost sprovedenih naučnih istraživanja i da pronađemo odgovarajuće mesto predloženim rešenjima u okviru šireg pogleda na oblast boriranja. Kako bismo rasvetlili mogućnosti boriranja u domenu podizanja kvaliteta i veka trajanja alata i kalupa, mi ćemo u ovom radu dati kritički osvrt na raspoložive literaturne podatke i sumiraćemo znanje u ovoj oblasti kroz sakupljanje, analizu i raspravu dosadašnjih istraživanja.

\*Autor za korespondenciju: Željko Stojanović

Email: zeljkoelemir@gmail.com

Rad primljen: 06. 02. 2016.

Rad prihvaćen: 16. 03. 2016.

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

Poštujući napred navedeno, autori su postavili ciljeve ovog rada. Teoretski cilj ovog rada je suštinski doprinos boljem razumevanju efekata boriranja na alate za obradu kovanjem kroz sumiranje i analizu prethodnih iskustava koja su afirmisala ovaj metod kao recept za povećanje radnog veka i kvaliteta alata. Praktični cilj ovog rada bio bi popularizacija metode, sa ciljem proširenja njene primene u domaćoj industriji kovanja radi proizvodnje fabrikata visokog kvaliteta.

## 2. ODABIR MATERIJALA ZA KOVAČKE KALUPE

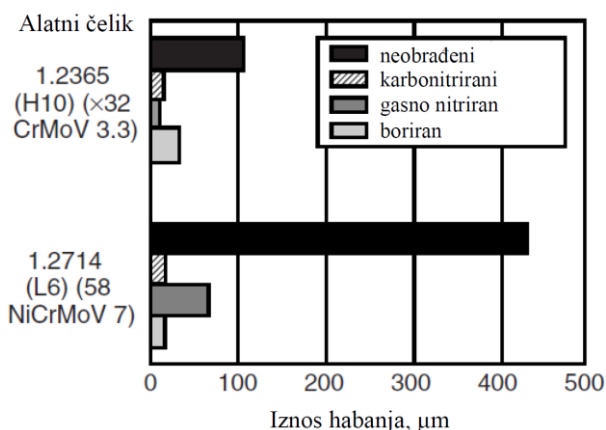
U vrućem i toplom kovanju, uglavnom, se koriste čelici za kalupe za rad u toplom stanju zbog njihove sposobnosti da zadrže njihovu tvrdoću na povišenim temperaturama sa dovoljnom čvrstoćom i žilavošću da bi izdržali napone koji su nametnuti tokom kovanja. Bilo je i nekih isplativih primena drugih materijala, kao što su keramike, karbidi i super legure, mada su ove primene ograničene zbog dizajnerskih ograničenja i troškova [4]. Čelici za izradu kalupa za rad u toplom stanju, korišćeni na temperaturama između 310 i 650 °C, sadrže dodatke hroma, volframa, vanadijuma i molibdena, kako bi pružili bolje karakteristike otvrdnjavanja, otpornost na abraziju i toplotno omekšavanje na visokim temperaturama. [5] Molibden povećava otpornost prema toplotnom omekšavanju, dok vanadijum unapređuje karakteristike habanja i toplotnog zamora. Čelici legirani volframom nisu otporni na termalni šok i ne smeju biti prekidno hlađeni vodom.

Odabir čelika za kalupe najviše zavisi od temperature razvijene u kalupima, primenjenog opterećenja i načina hlađenja kalupa. Većina alatnih čelika za rad u toplom stanju su nisko ugljenični čelici sa srednje ili visoko legirajućim elementima (6F i H serija). Hromni čelici za rad u toplom stanju (H10, H11, H13, H14 i H19) su najčešće korišćeni za kovačku primenu. Generalno, hromni čelici za kalupe zadržavaju njihovu tvrdoću do 425 °C, volframovi čelici za rad u toplom stanju (H21 do H26) zadržavaju mnogo od njihove tvrdoće sve do 620 °C. Osobine molibdenskih čelika za rad u toplom stanju su između onih kod hromnih i volframovih čelika.

Odabir materijala za kovačke kalupe primarno zavisi od njihove otpornosti na habanje, plastičnu deformaciju i zamor (mehanički i termalni). Da bi pružili otpornost na habanje i plastičnu deformaciju tvrdoća kalupa bi trebala da bude što je moguće veća. Ali kalupi bi trebali, takođe, da imaju adekvatnu žilavost pošto su izloženi promenama pritiska i temperatura. Materijali za kalupe se smatraju boljim ako su sposobni da zadrže njihovu tvrdoću na povišenim temperaturama, tj. oni treba da imaju bolja svojstva tvrdoće na visokim temperaturama.

## 3. OSVRT NA POVRŠINSKE TOPLOTNE OBRADNE KALUPE ZA KOVANJE

Mnoštvo slojeva i površinskih toplotnih obrada su dostupni kako bi se produžio radni vek kalupa, koji je ograničen habanjem. Među najčešćim zaštitnim slojevima nalaze se depoziti platiranog hroma i kobaltnih legura, koji se pridržavaju na površini kalupa putem mehaničke veze, kao i završeni depoziti koji iziskivaju metaluršku vezu [6]. Ova poslednja metoda može da se koristi u obnovi prekomerno oštećenih i istrošenih kalupa. Nedavno, upotreba keramičkih slojeva (na primer, karbidnih ili nitridnih slojeva) primenjenih od strane postupaka kao što su hemijska depoziciona isparenja (CVD), ustanovljena je kako bi se produžio radni vek kalupa. Površinski slojevi kalupa za oblikovanje železnih materijala mogu se, takođe, otvrdnuti putem legiranja azotom ili borom. Nitriranje je najčešća tehnika površinske toplotne obrade, a može se postići korišćenjem gasnog, tečnog ili plazma medijuma. Tehnika plazmom (jonsko nitriranje) deluje vrlo atraktivno, pošto formacija krutih belih slojeva, koji su neizbežni kod drugih postupaka nitriranja, može biti eliminisana ili bar smanjena. Boriranje površina kalupa, takođe, može biti postignuto korišćenjem različitih medijuma, a prijavljeno je povećanje radnog veka kalupa kao ono koje je dobijeno nitriranjem (slika 1). U poslednje vreme, znatno povišenje otpornosti na habanje i destrukciju čelika za izradu kalupa postiže se formiranjem na njihovu površinu tankih slojeva vanadijum karbida iz reakcionih medijuma kao što su rastopljeni sono kupatilo ili granulat [7]. Prema navodima naučnika Listera [8] sloj vanadijum karbida povećava vek trajanja alata od 5 do 30 puta više od neobloženih alata, povećanjem površinske tvrdoće uz istovremeno smanjenje koeficijenta trenja.



Slika 1. Poređenje iznosa habanja površinski obrađenih kovačkih alata posle 1000 ciklusa kovanja sa podmazivanjem [6,9]

Figure 1. Comparison of wear amounts of surfacetreated upsetting tools after 1000 forging cycles with lubricant [6,9]

Zaštitni slojevi se intenzivno koriste u oblikovanju deformisanjem, kako bi se smanjilo trenje i habanje. Slojevi se mogu primeniti na bilo kojem radnom predmetu ili kalupu. U slučaju radnog predmeta (obratka), slojevi su načinjeni od mekog materijala sa dobrom athezijom, podmazivanjem (mazivošću) i niskom smicajnom čvrstoćom. Kod oblikovanja u hladnom stanju, na primer, koriste se fosfatni slojevi kako bi smanjili trenje međusklopa (alata i predmeta) i habanje kalupa. Kod oblikovanja u toplom stanju, generalno, koriste se tvrdi slojevi. Oni se dodaju na površinu kalupa mehaničkim, termičkim ili hemijskim sredstvima. Tvrdi površinski sloj smanjuje silu trenja i brzinu habanja kada klizi nasuprot relativno mekanog materijala radnog predmeta ukoliko je spoj materijala sloja/radnog predmeta hemijski postojan, a zaštitni sloj dobro vezan i mehanički kompatibilan sa materijalom kalupa. Uloga tvrdog sloja je da spreči prodiranje, dok hemijska nerastvorljivost treba da osigura minimalno rastvaranje. Tvrdi zaštitni slojevi su posebno korisni kada je abrazija dominantan mehanizam habanja.

Tabela 1. Prosečne maksimalne dubine habanja ( $\mu\text{m}$ ) na površini kalupa nakon kovanja 500 poluga od čelika AISI 1040 na temperaturi od 1070 °C [10]

Table 1. Average maximum wear depths on surfaceengineered dies after upsetting 500 AISI 1040 steel billets at 1070 °C [10]

Postupci	Kalupi od H13 čelika		Kalupi od 6F3 čelika	
	Gore	Dole	Gore	Dole
Kaljen i otpuštan	46	110	156	236
Karbonitiran	4	5	5	37
Nitiran	10	12	11	9
Boriran	5	6	0	0
Vanadiran	0	0	0	0

Neki radovi izveštavaju o koristima od boriranja kalupa za toplo kovanje (tabela 1). Shivpuri i Babu [10] navode da je naučnik Venkatesan sa saradnicima evaluirao karbonitirane kalupe i upoređivao njihove performanse sa kaljenim i otpuštanim H13 i ASM 6F3 čelicima, nitiranim H13, boriranim i vanadiranim (TD) H13 čelicima. Rezultati dobijeni iz njihovih eksperimenata, prikazani su u tabeli 1. Oni su utvrdili da karbonitirani kalupi rade veoma dobro u poređenju sa neobrađenim H13. Detalji procesa kojeg su koristili nisu nam poznati.

#### 4.2. Tribološka evaluacija osobina boridnih slojeva, deponovanih na kalupe i čelične uzorke

Shivpuri i Babu [6] sa Državnog Univerziteta u Ohaju, izveštavaju o radu naučnika Vinczea, koji tvrdi da je povećanje veka trajanja kalupa iznosilo 70 % sa površinom kalupa obrađenom boriranjem u odnosu na neobrađene kalupe. U ovoj studiji oni ističu da je boriranje izvedeno ispunjavanjem kalupne šupljine (gravure) sa mešavinom koja se

## 4. PRIMENA DIFUZIONOG BORIRANJA NA MATERIJALIMA KALUPA ZA KOVANJE

### 4.1. Neki teoretski aspekti

Shodno ranijim navodima u ovom radu, uočava se da vek trajanja kalupa može biti povećan različitim metodama površinskog otvrdnjavanja. Metoda boriranja je dobro poznata i opisana zbog svoje univerzalne prirode, efikasnosti i reproduktivnosti rezultata. Bor se može dodati površinskim slojevima difuzionim postupkom, koji može da se izvede bilo u gasu, rastopljenom sonom kupatilu ili čvrstom sredstvu na temperaturama između 900 i 1000 °C, u zavisnosti od postupka i materijala koji se borira. Formiraju se ekstremno tvrdi površinski slojevi sa niskim koeficijentom trenja, obezbeđujući formiranje borida u osnovnom metalu. Postupak ne zahteva kaljenje. Ukoliko osnovni metal mora biti termički obrađen, termička obrada se može izvršiti nakon boriranja, iako je potrebna pažnja kako bi se smanjili naponi pri kaljenju da bi se sprečilo oštećenje boridnog sloja.

sastojala od 10 % B<sub>4</sub>C, 40 % natrijum borata i 50 % soli za kaljenje, i zagrevanjem sadržaja na 900 °C u trajanju od 3 sata. Ovaj postupak toplotne difuzije praćen je sa kaljenjem i otpuštanjem. Ostajući u istom kontekstu, oni dalje navode da su naučnici Burgreev i Dobnar 1972. godine, takođe, prijavili veliko povećanje veka trajanja kalupa za kovanje čekićem, kada se koristi boriranje.

Boriranje čelika je, takođe, vršeno elektrolitički. Atomi bora su elektrohemijski deponovani na metal iz kupatila ili rastopljene soli koja sadrži fluoride litijuma, natrijum, kalijum i bor. Kalupi su borirani na temperaturi od 800 do 900 °C u zaštitnoj atmosferi argona ili mešavine azota i vodonika. Debljina sloja je bila od 0.013 do 0.05 mm a obrada je trajala od 15 minuta do 5 sati. Konstatovano je da boriranje rezultira neželjenom interakcijom sa legirajućim elementima čelika za kovanje u toplom stanju (H serija čelika) i razvija meki sloj. Poroznost u boridnom sloju može se razviti kod čelika koji zahtevaju termičku obradu nakon boriranja. Iz tog

razloga, poželjno je ograničiti boriranje na one legure koje ne zahtevaju dalju visokotemperaturnu obradu. Na primer, čelik A6, koji se kali na vazduhu, može biti okaljen sa temperature boriranja, hlađenjem na vazduhu, i zahteva samo otpuštanje. Ovaj čelik, s toga, može biti bezbedno boriran.

Kao što je ranije prijavljeno, Venkatesan sa saradnicima [10] takođe prijavljuje unapređenje otpornosti na habanje boriranih alata u poređenju sa neboriranim. Boriranje niskolegiranih čelika rezultira razućenim (testerastim) boridnim slojem koji je dublji nego boridni slojevi formirani na visoko legiranim čelicima. Ovo je zbog toga što legirajući elementi smanjuju difuziju bora u osnovni materijal. Isti autori smatraju da ovo, možda, objašnjava rezultate do kojih je došao Venkatesan, koji je utvrdio da je nivo performansi boriranog H13 čelika uporediv sa karbonitriranjem. Međutim, Venkatesan je otkrio da je efikasnost boriranja bila veća kod nisko legiranih čelika za kalupe, kao što je 6F3.

Walter Fichtl, u svojoj studiji „Boriranje i njegove praktične primene“ [11], govori o izveštaju koji je 1975. godine podneo H. Kishimoto, u kome saopštava kako se boriranje kalupa za kovanje, u širokom opsegu veličina, uspešno koristi u Japanu od 1972. godine. Prema njemu, kalupi za kovanje, koji su izrađeni od čelika (SKD61), koji sadrži 0.4 % C, 5 % Cr, 1 % Mo i 1 % V, borirani su u trajanju od 3 sata na temperaturi od 900 °C u sredstvu Ekabor 1. Kalupi su naknadno okaljeni na vazduhu i otpušteni. Prosečan vek trajanja povećan je boriranjem šest puta. Minimalno povećanje veka trajanja bilo je od 2 do 3 puta, a maksimalno 10 puta. 1977. godine, R.H. Biddulph prijavljuje da borirani kalupi za izvlačenje žice mogu dovesti do povećanja veka trajanja od 10 puta [12].

Potruga za alternativom nitriranj u za otvrdnjavanje kovačkih alata, u literaturi [13], izvedena je upoređivanjem radne stabilnosti specifičnih alata nakon različitih termohemijskih postupaka. Određen je asortiman alata čija je izdržljivost povećana nakon boriranja, jer je poznato da su krtost i lomljivost negativne osobine boridnog sloja. Na primer, čak i prilikom određivanja tvrdoće sloja, mogu nastati pukotine i odvajanje u regionu otiska vikersovog utiskivača (što zavisi od tvrdoće osnovnog metala, npr., odvajanje može biti posmatrano na konstrukcionim čelicima tipa 38 KhS na 35 do 40 HRC). Krtost dobijenog sloja ograničava upotrebu boriranja u mašinogradnji i proizvodnji alata. Međutim, postoje slučajevi kada boridni sloj radi pod uslovima manjih udarnih opterećenja ili abrazivnog habanja: a onda se njegov efekat na otpornost na habanje teško može preceniti. Na primer, boriranje je postalo neophodan postupak za povećanje otpornosti na habanje osovinica i članaka gusenica različitih mašina. U istoj literaturi [13], autori su ustanovili da borirani alati za hidraulične prese imaju izdržljivost koja nije lošija od one koju

imaju nitrirani delovi. Pod uslovima dubokog probijanja čeličnih mlaznica, izdržljivost boriranih probojaca je bila 25 do 30 % veća nego onih nitriranih. Prema tome, isti autori su pokazali da razmatrana grupa alata za kovanje hidrauličnim presama može biti još uspešnije otvrdnuta boriranjem nego nitriranjem.

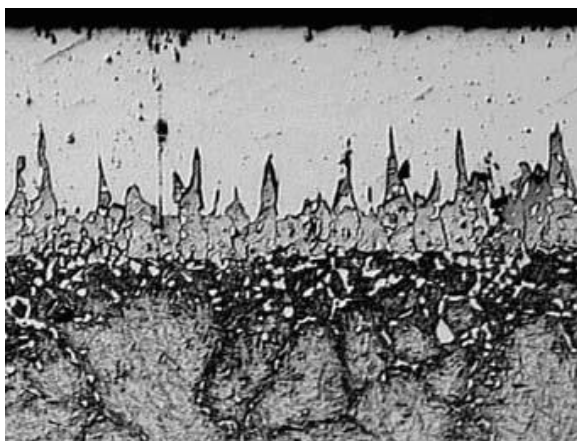
Upotreba praha bora u rastopini tehničkog boraksa umesto borkarbida  $B_4C$  ili železoborida FeB, omogućilo im je da ubrzaju postupak boriranja na račun njegove visoke reaktivnosti kao i da smanje količinu čvrste faze i sadržaj mulja u kupatilu. U cilju podizanja fluidnosti rastopa, dodali su određenu količinu hlorida i fluorida alkalnog metala u rastop. Njihovi eksperimenti su pokazali celishodnost upotrebe boriranja kod toplog kovanja za probojce za hidraulične prese, tj. za slučaj glatkog i manjeg udarnog opterećenja alata. Na primer, stabilnost probojaca za probijanje i trnova za izvlačenje u toplom kovanju predformi mlaznica nije lošija nego ona kod nitriranih probojaca, a u nekim slučajevima je čak 1.5 puta veća (ove fluktuacije stabilnosti povezane su sa razlikama u sastavu čelika za kovanje). Izvršili su postupak boriranja u rastopu sledećeg sastava: 73-78 %  $Na_2B_4O_7$  (boraks), 15-20 % NaCl i 57 % B (crni prah bora). Rastopljeni boraks sa prahom bora ima dobru fluidnost, što umanjuje njegovo uklanjanje iz kupatila u poređenju sa rastopom sa borkarbidom ili sa rastopom za boriranje elektrolizom. Proučavanje alata koji su bili van upotrebe, pokazalo je da oni rade uspešno u slučaju kada je visoka površinska tvrdoća kombinovana sa jezgrom tvrdoće od 40 do 45 HRC.

Boriranje daje dve faze boridnog sloja na površini delova, koje imaju sastav i proporciju faza drugačiju od onih dobijenih elektrolizom. Iznos tvrdoće železo borida, od 1700 do 1850 HV, je viša nego u sloju dobijenom iz rastopa sa borkarbidom. Sledeći sloj  $Fe_2B$  imao je tvrdoću od 1350 do 1400 HV. Dobijeni boridni sloj je bio gust i imao je glatku i tvrd u površinu. Površina alata je isprana od zaostalog rastopa u vrućoj vodi, nakon kaljenja. Po pravilu, klasa čistoće površine alata je očuvana nakon boriranja.

Istražujući slučaj svojstava i kinetike boriranog AISI H13 čelika, K. Genel [14] je u svojoj studiji sproveo serije eksperimenata sa Ekabor I prahovima na temperaturi obrade od 1073, 1173 i 1273 °K u trajanju od 1 do 5 sati. Prisustvo borida FeB i  $Fe_2B$  u čeličnom supstratu potvrdio je optičkom i skenirajućom elektronskom mikroskopijom. Rezultati ovog istraživanja ukazuju da morfologija boridnog sloja ima glatku i kompaktnu (zbienu) morfologiju, a njegova tvrdoća je bila u rasponu od 1650 do 2000 HV. Tranzitna (prelazna) zona

posmatrana između tvrdog boridnog sloja i osnovnog materijala je bila relativno mekša nego supstrat. Kinetika boriranja pokazala je parabolični odnos između debljine sloja i vremena obrade, a izračunata aktivaciona energija za obradu iznosila je 186,2 kJ/mol.

Sukru Taktak je u svom radu [15] proučavao udarnu (lomnu) žilavost AISI H13 i AISI 304 čelika. Boriranje je sproveo na 800 do 950 °C u trajanju od 3, 5 i 7 sati. Rezultati su ukazivali da lomna žilavost opada sa povećanjem vremena obrade za oba čelika. Boridi formirani na AISI H13 čeliku imali su veću lomnu žilavost u odnosu na boride formirane na AISI 304 čeliku tretiranom na 5 i 7 sati. Proučavajući korozivno ponašanje boriranog AISI H13 čelika, Kariofillis sa saradnicima [16] 2006. godine izveštava da boridna prevlaka unapređuje korozivnu otpornost H13 čelika uglavnom u  $H_2SO_4$  i  $H_3PO_5$  rastvorima za kratko vreme izlaganja. U slučaju produženog perioda potapanja, korozivno ponašanje je slično kao kod neboriranog, čistog H13 čelika. Suprotno od toga, isti autor [16] u svom izveštaju ističe kako H13 čelik ima bolju korozivnu otpornost u okruženju HCL kiseline u poređenju sa boriranim H13 čelikom. Slika 2 pokazuje optički poprečni presek boridnog sloja dobijenog na čeliku AISI H13, boriranjem u rastopljenom sonom kupatilu boraksa sa dodatkom 10 % aluminijuma na temperaturi od 1000 °C u trajanju od 4 sata. Uočava se spoljašnji boridni sloj i feritni podsloj.



Slika 2. Optička mikrografija poprečnog preseka boriranog AISI H13 čelika, tvrdoće  $1706 \pm 66$  HV ( $20 \mu m$ ) [17]

Figure 2. Optical micrograph of cross section of boride layer on H13 steel, hardness  $1706 \pm 66$  HV ( $20 \mu m$ ) [17]

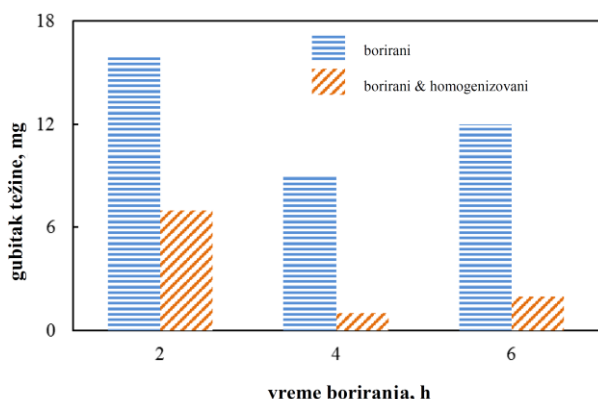
U industriji, visokouglenični hromni alatni čelici za rad u hladnom stanju (D tip) su najčešće korišćeni alatni čelici za rad u hladnom stanju. Oni se obično koriste za različite vrste kalupa za rad u hladnom stanju, valjaka i probojaca. W. Muhammad [2] je izvršio termoreaktivno difuziono borira-

nje u rastopljenom kupatilu na 950 °C u trajanju od 2, 4 i 6 sati, kako bi istražio neke fizičke i mehaničke osobine boriranog visokougleničnog hromnog alatnog čelika za rad u hladnom stanju, D3. Izabrao je tri različita trajanja boriranja, a termičku obradu nakon boriranja je sproveo u pokušaju da postigne jednofazni sloj. Kako bi opisao efekat vremena boriranja na morfologiju boridnog sloja, faze, površinsku tvrdoću i osobine habanja, koristio je metalografska ispitivanja, rendgensku difrakciju, ispitivanje tvrdoće, skenirajuću elektronsku mikroskopiju i merenja habanja. Iz poluge je isekao cilindrične uzorke prečnika 10 mm, a dužine 15 mm i ultrazvučno ih očistio. Sastav kupatila je bio: 30 %  $B_4C$  i 70 % boraksa. Nakon boriranja, uzorci su okaljani u vodi.

Termičku obradu nakon boriranja sproveo je na 800 °C u trajanju od 6 sati u zaštitnoj atmosferi inertnog gasa. Borirani uzorci su bili isečeni, polirani i nagriženi u 2 % Nitalu radi merenja dubine boridnog sloja uz pomoć optičkog mikroskopa opremljenog sa digitalnim fotoaparatom. Profili tvrdoće su bili uzeti na poliranim poprečnim presecima sa površine. Studije rendgenske difrakcije je sproveo da identifikuje faze u sloju. Ispitivanje habanja „valjčićem po disku“ sprovedeno je da bi se proučavala istrošena površina i gubitak težine na neboriranim, boriranim i borirano/homogenizovanim uzorcima. Rezultati do kojih je došao ukazivali su na sledeće zaključke: 1. površinska tvrdoća je unapređena sa 243 HV na 1430 HV nakon boriranja i homogenizacije, 2. dubina je osetljiva na vreme boriranja dok površinska tvrdoća nije bila značajno promenjena, 3. borirani uzorci u trajanju od 4 sata, nakon homogenizacije, pokazali su najbolje habajuće osobine, 4. otpornost na habanje borirano/homogenizovanih uzoraka je bila superiorija u odnosu na borirane uzorke, 5. studija rendgenske difrakcije je pokazala skoro jednofazan  $Fe_2B$  sloj nakon homogenizacije. Na slici 3 su prezentovani podaci o gubitku težine. Dijagram pokazuje da je najbolja otpornost na habanje postignuta kod uzoraka obrađenih u trajanju od 4 sata.

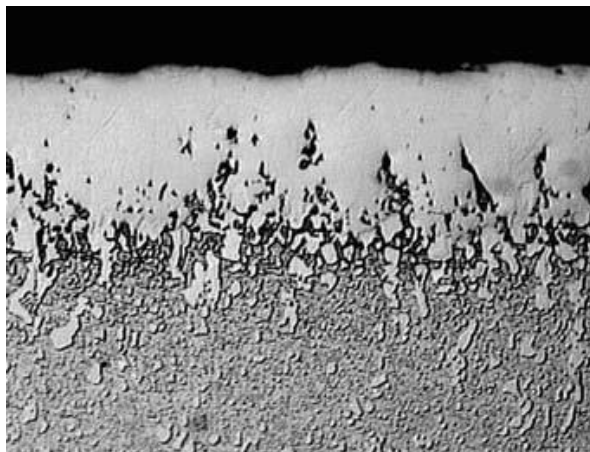
AISI D2 je najčešće korišćen čelik u svojoj klasi za izradu alata za rad u hladnom stanju. Kao i prethodno opisan čelik D3, i on nudi visoku kaljivost, nisku distorziju posle kaljenja, visoku otpornost prema omekšavanju i dobru otpornost prema habanju. Upotreba odgovarajućih tvrdih prevlaka na ovom čeliku, može dodatno poboljšati njegovu otpornost na habanje. Oliveira je sa saradnicima [18] formirao boridne slojeve na AISI D2 čeliku koristeći kupatilo sa boraksom, koje je sadržavalo: gvožđetitanijum i aluminijum na 800 do 1000 °C u trajanju od 4 sata. Čelik obrađen boriranjem karakterisali su optičkom mikroskopijom, merenjem mikrotvrdoće, rendgenskom difrakcijom (XRD) i

optičkom mikroskopijom sa tinjajućim pražnjenjem, da bi proverili efekat sastava kupatila i temperaturu obrade na formiranje sloja.



Slika 3. Poređenje podataka ispitivanja na habanje boriranih i borirano/homogenizovanih uzoraka [2]  
Figure 3. Comparison of wear test data of borided and borided & homogenized samples [2]

U zavisnosti od sastava kupatila,  $Fe_2B$  i  $FeB$  su bile dominantne faze u boridnim slojevima. Slojevi su pokazivali testerastozubnu morfologiju na interfejsu osnovnog materijala, debljine sloja su varirale od 60 do 120  $\mu m$ , a tvrdoća je bila u opsegu od 1596 do 1744 HV. Slika 4 pokazuje optički poprečni presek boridnog sloja dobijenog na čeliku AISI D2, boriranjem u rastopljenom sonom kupatilu boraksa sa dodatkom 10 % aluminijuma na temperaturi od 1000 °C u trajanju od 4 sata. Na slici 4 se može uočiti samo formacija boridnog sloja sa morfologijom testerasto zubnog tipa.



Slika 4. Optička mikrografija poprečnog preseka boridnog sloja dobijenog na AISI D2 čeliku, tvrdoće  $1717 \pm 55$  HV (20  $\mu m$ ) [17]

Figure 4. Optical micrograph of cross section of boride layer obtained on AISI D2 steel, hardness  $1717 \pm 55$  HV (20  $\mu m$ ) [17]

Peter Jurči i Mária Hudáková [3] izveli su boriranje H11 čelika za rad u toplom stanju sa različitim parametrima postupka, austenitizaciju, kalje-

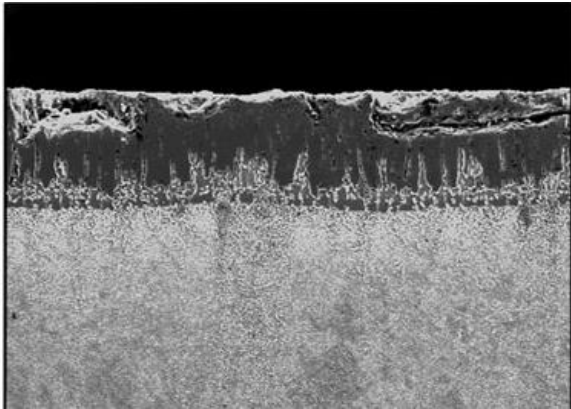
nje i otpuštanje do tvrdoće jezgra od 47 do 48 HRC.

Cilj njihovog rada bio je da opišu strukturu i osobine boridnih slojeva formiranih na površini H11 čelika i da ih povežu sa krtošću materijala. Pripremili su okrugle tanjiraste uzorke, 20 mm u prečniku i 5 mm debljine, namenjene za ispitivanje strukture i merenja tvrdoće. Pored uzoraka za mikrostrukturnu evaluaciju, takođe su pripremili uzorke za ispitivanje udarne žilavosti po Šarpiju prema NADCA 20297 standardu. Obe vrste uzoraka su očistili, odmastili i borirali koristeći mešavinu prahova Duroborid® u hermetički zatvorenim kontejnerima, na temperaturi 1030 °C u trajanju od 30, 45, 75 i 150 min. Nakon boriranja, kontejneri sa uzorcima su bili polako ohlađeni u peći do sobne temperature, a zatim su uzorci bili ukonjeni i podvrgnuti standardnoj vakuumskoj termičkoj obradi. Ovaj postupak se sastojao od austenitizacije na 1020 °C u trajanju od 30 minuta, gasnog kaljenja u azotu pod pritiskom od 6 bara, trostrukog otpuštanja, sa svakim ciklusom otpuštanja u trajanju od 2 sata. Prva temperatura otpuštanja je bila 570 °C, druga 610 °C a treća 550°C. Posle svakog ciklusa otpuštanja, uzorci su bili polako hlađeni do sobne temperature. Nakon ove obrade, dobili su tvrdoću jezgra od 47-48 HRC.

Dobijeni rezultati ukazivali su na sledeće zaključke: 1. svi slojevi imali su debljinu koja je prelazila 50  $\mu m$ , 2. u slučaju monofaznih slojeva, nisu pronašli pukotine ili nehomogenosti u sloju između osnovnog materijala i sloja, 3. ako se sloj sastojao od dve faze, otkrili su uzdužne pukotine na granici ovih faza, 4. boridni sloj formiran u trajanju od 150 min. sastojao se od  $FeB$  i  $Fe_2B$  faza, dok su slojevi proizvedeni za kraće vreme obrade bili formirani samo od  $Fe_2B$  faze, 5. u svim slučajevima, boridi su bili legirani, uglavnom, sa hromom, 6. slojevi formirani u trajanju od 150 min. imali su mikrotvrdoću od 2325 HV i 1700 HV za  $FeB$  i  $Fe_2B$  slojeve, 7. slojevi formirani u trajanju od 30, 45 i 75 min. imali su mikrotvrdoću od 1500 HV, izuzev površinskog sloja proizvedenog u trajanju od 75 min, čija je tvrdoća bila znatno viša. Objavljajući efekte boriranja na udarnu žilavost materijala, isti autori prijavljuju da prisustvo boridnih slojeva na površini H11 čelika dovodi do znatnog snižavanja udarne energije po Šarpiju. Na osnovu toga naglašavaju da je upotreba boriranja za dinamički opterećene alate za rad u toplom stanju teško moguća.

Kao što se jasno vidi na slici 5, boridni sloj formiran u trajanju od 150 min. je napukao na sučelju između dve faze sloja. Primetno je da pukotina propagira uzdužno na površini. Prema autorima,

ovo pucanje bi se moglo objasniti činjenicom da kada su, npr. obe faze formirane, diskontinuitet napona na njihovom sučelju može dovesti do pojave naprslina, uglavnom u području faze FeB.



Slika 5. Boridni sloj na površini H11 čelika formiran na 1030 °C u trajanju od 150 min. (75 μm) [3]

Figure 5. Boronized layer on the H11 steel surface formed at 1030 °C for 150 min. (75 μm) [3]

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je pisan sa ciljem da se stručnoj publici i proizvodnom sektoru predstave rezultati inicijalnih empirijskih istraživanja, trendovi u procesu obavljanja boriranja materijala kalupa za oblikovanje, unapređenja već postojećih tehnika i metoda boriranja, kao i mogućnosti, prednosti i ograničenja njegove primene, što određenoj stručnoj grupaciji, možda, nije do sada poznato, a što nudi značajno poboljšanje uslova, rezultata rada i veka trajanja alata. Ovo naše istraživanje je, takođe, pokazalo da je pravilan izbor materijala kalupa, načina površinskog ojačavanja boriranjem, u smislu izbora adekvatnih komponenti procesa, kao i izbor načina termičke obrade nakon boriranja za neki materijal ili kalup, složen problem, a u svakom slučaju ima opšti cilj da se postigne poboljšanje, direktno ili kompromisno, onih osobina koje ograničavaju vek trajanja kalupa. U tom smislu, rad pruža jednoznačna i konkretna uputstva za konstruktore alata i tehnologe kovanja, da bi, u pojedinačnom slučaju, za određeni materijal kalupa mogli da izaberu odgovarajući način obrade. Sve veći broj prijavljenih radova inostranih autora ukazuje na porast aktuelnosti problematike inženjerstva površina u svetlu davanja rešenja koja doprinose uštedama u obradi oblikovanjem, što implicira veoma povoljnu osnovu za uspostavljanje i održavanje tesne i bliske saradnje istraživačkog sektora i sektora privrede na poslovima unapređivanja ekonomičnosti kovanja.

U mnogim od ovde raspravljenih radova, zastupljeni su rezultati laboratorijskih istraživanja (sa

uzorcima za univerzalne mašine za ispitivanje na habanje) od kojih se ponašanje kalupa u stvarnom pogonu može jako razlikovati. U rešavanju problema veka trajanja alata treba polaziti i od takvih iskustava, ali treba imati u vidu da tek u pogonskim istraživanjima počinje pravo rešavanje problema. U takvom slučaju, privredni sektor bi pružio neophodnu valorizaciju i potvrdu opravdanosti naučnih istraživanja, što bi delovalo podsticajno u istraživačkom sektoru u smislu nastavka istraživanja sa ciljem proširenja dijapazona rešenja ili poboljšavanja postupka boriranja.

## 6. LITERATURA

- [1] M.Matijević, M.Stupnišek (2006) Application of vanadizing process for tools and dies, In: 15th IFHTSE and SMT 20 Congress, Proceeding of 15th IFHTSE and SMT Congress, ASMET, Vienna, p.278-282.
- [2] W.Muhammad (2013) Boriding of high carbon high chromium cold work tool steel, In: International symposium of advanced material (ISAM 2013), Pakistan, p.16.
- [3] P.Jurči, M.Hudáková (2010) Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel, Journ of Mater Engine and Perfor, 20(7), 1180-1187.
- [4] S.Maslov (2012) Impact on AISI H13 tool steel hotmelt loss and wear properties of the multiple surface treatments, Fabrieres Journ, 1, 121.
- [5] D.Mayur (2011) Improvements in hot forging process using alternative die materials and finite element analysis for wear prediction and die design optimization, Master thesis, Ohio.
- [6] S.Rajiv, B.Sailesh (2005) Die wear, In: ASM Handbook, Volume 14A, Metalworking, Bulk Forming, S.L. Semiatin (Ed), p.62-83.
- [7] Z.Stojanović, S.Erić, S.Stanisavljev, M.Đurđev (2015) Povećanje efikasnosti alata za kovanje Toyota difuzionim postupkom, Zaštita Materijala, 56(1), 92-99.
- [8] M.Lister (2005) Vanadium carbide diffusion coatings for tool and die components, In: Heat treating: Proceedings of the 23rd heat treating society conference, Pennsylvania, Pittsburg, p.162-166
- [9] B.Sailesh (2004) A material based approach to creating wear resistant surfaces for hot forging, Dissertation, Ohio.
- [10] B.Sailesh, R.Dilmar, S.Rajiv (1999) Material and surface engineering for precision forging dies, The Ohio State University, Ohio.
- [11] F.Walter (1981) Boronizing and its practical applications, Mater in Engineer, 2, 276-286.
- [12] R.Biddulph (1977) Boronizing for erosion resistance, Thin Solid Films, 45(2), 341-347.
- [13] E.Fainshmidt, V.Pegashin (2000) Thermochemical treatment of tools for hot forging, Metal Scien and Heat Treat, 42(7), 263-266.

- [14] K.Genel (2006) Boriding kinetics of H13 steel, Vacuum, 80(5), 451-457.
- [15] T.Sukru (2007) Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, Mater & Design, 28(6), 1836-1843.
- [16] G.Kariofillis, G.Kiourtsidis, D.Tsipas (2006) Corrosion behavior of borided AISI H13 hot work steel, Surf and Coat Techno, 201(1), 19-24.
- [17] L.C.Casteletti, F.Fernandes, S.C.Heck, C. de Oliveira, A.N.Lombardi, G.Totten (2009) Pack and Salth Bath Diffusion Treatments on Steels. Heat Treat Progr 9(5) 49-52.
- [18] C.N.Oliveira, L.C.Casteletti, A.N. Lombardi, G. Totten, S.C.Heck (2010) Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel, Vacuum, 84(6), 792-796.

## ABSTRACT

### INCREASING THE EFFICIENCY OF FORGING TOOLS BY THERMAL DIFFUSION BORONIZING

*In this paper is given a review of literature data about research of influence thermal diffusion boronizing on increasing of working life and quality of forging dies. Service life of tools depends mainly of the surface of material, and it is important that the surface has features such as: corrosion resistance, wear resistance and resistance to oxidation. In order to improve the surface properties some surface treatments with order to protect the surface and improve performance of materials are applied. Service life of steel dies for forging processing, which is limited by wear, can be increased by various surface treatments in which the surface layer alloyed with nitrogen, carbon or boron. These diffusion coatings consist of metal or nonmetal diffusion in the base material at high temperatures. In searching for an alternative to conventional methods, the authors came to the conclusion that experiences in boronizing of a wide range of tools for forging processing showed that the operating stability of the parts subjected to this process, increased from two to ten times.*

**Keywords:** boronizing, forging dies, quality, service life.

*Review paper*

*Paper received: 06. 02. 2016.*

*Paper accepted: 16. 03. 2016.*

*Paper is available on the website: [www.idk.org.rs/journal](http://www.idk.org.rs/journal)*