

ŽELJKO STOJANOVIĆ¹, SPASOJE ERIĆ²
SANJA STANISAVLJEV³, MIĆA ĐURĐEV⁴

Originalni naučni rad
UDC:621.733.075

Povećanje efikasnosti alata za kovanje Toyota difuzionim postupkom

U radu je dat pregled literaturnih podataka o istraživanjima uticaja sloja vanadijum karbida deponovanog Toyota difuzionim postupkom na povećanje radnog veka i kvaliteta alata za obradu kovanjem. Kalupi za kovanje podvrgnuti su teškoj adhezivnoj i abrazivnoj habanju, visokim naponima i temperaturama. Površina kalupa i region u blizini površine podvrgnuti su najtežim uslovima tokom obrade kovanjem i s toga većina defekata i uzroka destrukcije potiču iz ovog regiona. Zbog toga, rad uzima u razmatranje i različite komplikovane mehanizme habanja i destrukcije površine alata za obradu kovanjem, odnosno onu mrežu različitih aspekata koji utiču na vek trajanja alata a koji svojim delovanjem prouzrokuju prevremeno uklanjanje alata iz upotrebe.

Ključne reči: vanadijum karbid, kalup za kovanje, vek trajanja, habanje, destrukcija.

1. UVOD

Razvoj industrije kovanja značajno je uslovljen razvojem auto industrije, koja ugrađuje velike količine delova dobijenih ovom tehnologijom. Proizvodnja otkivaka najveća je u Evropi, Japanu i Severnoj Americi, a uposlednje vreme velike količine otkivaka se proizvode u Kini, Koreji i Indiji. Kovanjem se takođe, dobijaju delovikoj nalaze primenu u mnogim drugim granama industrije. Prema podacima *Japan Forging Association* industrija otkivaka u Japanu i dalje će biti jedna od vodećih industrijskih grana koja će biti orijentisana na proizvodnju kompleksnih, preciznih i visokokvalitetnih delova [1].

Sa razvojem nauke i tehnologije i povećanjem žestoke konkurencije na tržištu, performanse kalupa postaju sve zahtevnije a pitanje veka trajanja postaje sve izraženije [2]. Kalup je jedan od značajnijih delova opreme u masovnoj proizvodnji čiji je kvalitet ključni faktor koji utiče na kvalitet proizvoda i na ekonomske koristi za kompanije. Jedan od glavnih problema su loša svojstva površine kalupa kao posledica destrukcije habanjem. Pitanje veka trajanja kalupa je složeno usled velikog broja faktora koji mogu uticati na vek trajanja kalupa. Habanje kalupa je kompleksna, vremenski zavisna pojava koja pre svega zavisi od četiri komponente sistema: kalupa, međusklopa, predmeta obrade i uslova obrade. Učinak ove četiri komponente može se kategorizovati u više procesa – vezanih razmatranja, uključujući dizajn kalupa, materijal kalupa, termičku obradu, podmazivanje, po-vršinsku obradu i uslove obrade.

Kalup nameće geometriju deformisanom materijalu. Dizajn kalupnih šupljina (gravura) upravlja kliznim brzinama, temperaturom i pritiscima među sklopa. Posebno važna razmatranja sa stanovišta habanja i destrukcije su radijusi uglova (čoškova) i zaobljenja u šupljinama kalupa. Još jedno važno razmatranje za habanje su mikro i makrostrukturne osobine materijala kalupa, njegov sastav, mikrostruktura (jednakost, unutrašnji nedostaci i sekundarni karbidi) i mehaničke i fizičke osobine. Mehanička i hemijska interakcija materijala kalupa sa radnim predmetom i kontaminirajućim materijama (podmazivanje, krhotine i ljsuske) zavisi od sastava i mikrostrukture [3].

Mehanička svojstva i vek trajanja kalupa može se u velikoj meri poboljšati odgovarajućom tehnikom površinskog ojačavanja. S toga tehnika površinskog ojačavanja igra veoma važnu ulogu u industriji kalupa i privlači široku pažnju. Neophodno je pronaći naprednu tehnologiju površinske modifikacije kako bi se poboljšao vek kalupa i smanjio trošak ili povećala produktivnost [4]. Nedavno uvođenje slojeva vanadijum karbida koji su metalurški vezani za površinu alata za kovanje obezbedilo je proizvođačima sredstvo za sticanje značajnih ušteda usled poboljšanja performansi alata [5].

Poštujući napred navedeno, autori su postavili ciljeve ovog rada. Teoretski cilj ovog rada je suštinski doprinos boljem razumevanju različitih aspekata koji utiču na vek trajanja alata kroz objektivno, detaljno, svestrano i potpuno klasifikovanje, opisivanje i analiziranje rezultata dosadašnjih istraživanja, kao i sumiranje i analiza 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.

Adrese autora:¹Partizanska 34/e, 23208 Elemir,
²Visoka tehnička škola strukovnih studija, Zrenjanin,
³Tehnički fakultet „M. Pupin“, Zrenjanin, ⁴Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Primljeno za publikovanje: 11. 08. 2014.

Dorađeno za publikovanje: 02. 10. 2014.

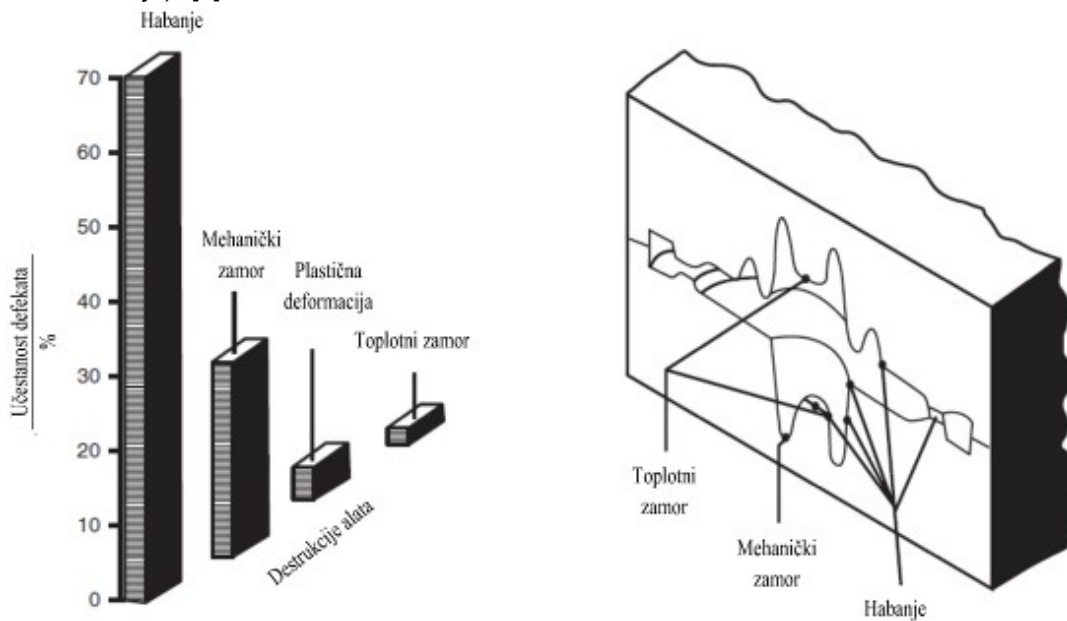
Prihvaćeno za publikovanje: 19. 11. 2014.

2. MEHANIZMI I MODELI HABANJA I DESTRUKCIJE KALUPA

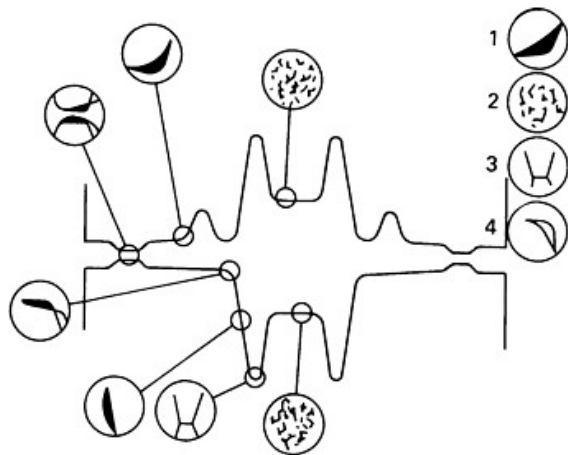
2.1. Razlozi za uklanjanje alata iz upotrebe

Habanje materijala javlja se pomoću mnogih različitih mehanizama. Terminologija korišćena za opisivanje ovih mehanizama zavisi od polja primene. Neki od mehanizama habanja identifikovanih u habanju i destrukciji kalupa su: adhezivno habanje, abrazivno habanje, toplotni zamor, mehanički zamor, plastična deformacija i velike naprsline (katastrofalna destrukcija) [3]. U zavisnosti od vrste

obrade plastičnom deformacijom, različite su i učestalosti oštećenja alata i nastali troškovi. Zbog visokih opterećenja, prelom je glavni razlog destrukcije alata u hladnom kovanju. Toplotno opterećenje i kontakt sa vrućim metalom tokom obrade deformisanjem čini habanje najčešćim razlogom za destrukciju u toplom kovanju. Abrazivno habanje, mehanički zamor, plastična deformacija i toplotni zamor zajednički su većini procesa oblikovanja, slika 1 [3]. Tipični vidovi destrukcije i lokacije na kalupima za kovanje, prikazani su na slici 2 [6].



Slika 1 - Učestanost i lokacija tipičnih destrukcija kalupa tokom kovanja



Slika 2 - Uobičajeni mehanizmi destrukcije za kovačke kalupe. 1, abrazivno habanje; 2, toplotni zamor; 3, mehanički zamor; 4, plastična deformacija

2.2. Habanje delova kalupa

Shodno ranijim navodima u ovom radu, u poglavlju o razlozima za uklanjanje alata iz upotrebe, kao jedna od glavnih vrsta oštećenja površine kalupa uočava se habanje. To je glavni razlog za povla-

čenje alata korišćenih u toplim obradama plastičnom deformacijom jer ima veliki uticaj na tolerancije i kvalitet površine obrađenog dela a time i na radni vek alata. [7] Generalno je prihvaćeno da je ova pojava veoma komplikovana i da su uključeni brojni mehanizmi i faktori. Stvarni mehanizam koji izaziva trenje u kontaktnom međusklopu između alata i predmeta obrade razumljiv je samo na osnovu klasične fizike. Fizički pristup pruža efikasnu osnovu za industrijsko istraživanje. Ovo je pokazalo da se habanje odvija uprkos visokom stepenu tvrdoće. Iako priroda habanja i dalje krije mnogo nejasnih aspekata, industrijsko istraživanje je utvrdilo kako se usled habanja dimenzije i kvalitet površine menjaju tokom operacije oblikovanja. U toplom kovanju, mehanizam adhezivnog habanja može biti dominantan usled lokalne veze između kalupa i predmeta obrade. Adhezivno habanje je prouzrokovano adhezivnim silama na spoju između kontakta površine kalupa i materijala koji se obrađuje. [8] Abrazivno habanje šupljina kalupa se najviše vidi u onim delovima kalupa, gde postoji najveće kretanje materijala tokom kovanja.

2.3. Toplotni i mehanički zamor

Naprslina usled toplotnog zamora su glavni način destrukcije i propadanja alatnog čelika za rad u toplom stanju koji se koristi za izradu kalupa a one se obično javljaju u različitim stepenima zajedno sa abrazivnim habanjem u kalupima za kovanje u toplom stanju. Toplotni zamor nastaje usled kovanja u toplom stanju zbog razlike temperatura između kalupa i zagrejanog metala. Periodični pritisni i zatezni naponi tokom proizvodnje rezultuju toplotnim zamorom. Najvažniji faktor u toplotnom zamoru je opseg (amplituda) izduženja tokom ciklusa oblikovanja.

Mehanički zamor kalupa za oblikovanje je pod uticajem primenjenih opterećenja, prosečne temperature kalupa i stanja površine kalupa. Zamorne naprsline otpočinju na lokacijama koncentracije napona (šupljine, čoškovi, zaobljenja) ili pojavama kao što su rupe, prostori za žleb i oznake u vidu dubokog otiska na kalupima. Dominantna vrsta zamora koja se nalazi u kalupima za oblikovanje metala je nisko ciklični zamor, koji je povezan sa visokim naponom i temperaturom. Nisko ciklični zamor je definisan kao mehaničko zamorno propadanje koje se javlja posle manje od 1000 ciklusa napona [3].

2.4. Plastična deformacija

Plastična deformacija u kalupima proizilazi od prekomernog pritiska i niskog vrućeg napona tečenja materijala kalupa. Može biti smanjena redizajnom šupljina i pravilnim izborom materijala kalupa. Hlađenje kalupa takođe smanjuje ove uticaje, ali se mora voditi računa da se izbegnu temperaturni ciklusi što može izazvati fazne transformacije.

2.5. Velike naprsline i lom kalupa

Velike naprsline ili katastrofalna destrukcija kalupa je ograničavajući uslov sa aspekta radnog veka kalupa. Propadanje se javlja brzo (u nekoliko ciklusa) zbog primenjenog visokog napona ili niske žilavosti materijala kalupa. Kao i u slučaju mehaničkog zamora, visoki naponi mogu biti rezultat lošeg dizajna kalupa, nepravilnog naleganja, iskakanja dela opreme ili umetka kalupa ili nedostatak kontrole opterećenja i energije pri kovanju. Nepravilni izbor materijala kalupa može takođe da dovede do katastrofičnih destrukcija. Kalupi za teško obradive materijale ili u kojima postoje tačke sa visokom koncentracijom napona zahtevaju čelike sa dobrom lomnom žilavošću. Ovi čelici uključuju niskolegirane čelike (kao što su 6F3 i 6F7) i neke hromne čelike za rad u toplom stanju (kao što je H11). Kada se koriste visokolegirani čelici (kao što su H19 i H21, npr. zbog njihove otpornosti prema habanju) oni bi trebalo da budu otpušteni natvrdoću nižu od normalne sa ciljem povećanja žilavosti ako su kalupi osetljivi na katastrofalne destrukcije.

Lom alata je glavna opasnost u proizvodnji hladnim oblikovanjem zbog visokih troškova koji nastaju ne samo zamenom alata, već takođe i od oštećenja koje može biti uzrokovano slomljenim alatom u automatskom okruženju. Lom usled preopterećenja može se izbeći upotrebom modernih tehnika procene napona i deformacija, kao što je FEM, ali se lom usled zamora uvek javlja u visoko opterećenim alatima. Lom se odvija kada zbir mehaničkih i toplotnih opterećenja pređe kritičnu vrednost. Ova vrednost nije čisto svojstvo materijala, već zavisi od stanja multiaksijalnog napona.

3. UTICAJ RAZLIČITIH FAKTORA NA VEK TRAJANJA ALATA

Neizvesnosti u proceni očekivanog radnog veka alata i time troškova alata po komadu uzrokovana je:

1. ogromnom raznovrsnošću i interakciji štetnih faktora,
2. fabričkim specifičnim karakterom radnog veka alata,
3. stohastičkim fenomenom destrukcije alata,
4. specifičnim alatom i
5. specifičnom primenom.

Klasična podela faktora koji utiču na radni vek alata pravi razliku između razloga destrukcije. Oni pokrivaju mnogo komplikovaniju mrežu faktora, međutim, praktično opisuju čitav sistem oblikovanja i sve zahteve za kvalitet proizvoda stavljajući sada alat u centar razmatranja. Očigledno, prosečan vek trajanja alata za proizvodnju blizu konačnog oblika je znatno niži nego za proizvodnju predmeta obrade sa većim poljima tolerancije. Razlozi za ranu destrukciju alata mogu biti:

1. veći naponi zbog visokog stepena punjenja šupljina što dovodi do ranijeg zamornog loma,
2. manje habanje alata je dozvoljeno zbog uskog polja tolerancije potrebnog za predmet obrade.

Glavna prepreka u objašnjenju uticaja različitih parametara sistema oblikovanja je složenost međuveze između njih. Izmena podmazivanja, na primer, ne samo da menja kontaktni međusklop između alata i radnog predmeta na mikrogeometrijskom nivou, već takođe izaziva promenu u uslovima trenja, kao što su:

1. polje brzina (raspodela brzina u datom regionu),
2. normalni i tangencijalni naponi,
3. kontaktna brzina,
4. temperaturni uslovi na površini i
5. pritisak oblikovanja.

Tako se postavlja pitanje: šta je suštinski razlog za promenu radnog veka alata? Povećanje energije oblikovanja, na primer, rezultira višom temperaturom alata. Dodatna visina temperature usled

trenja između predmeta obrade i alata, može podići lokalnu temperaturu površine kritično iznad temperature otpuštanja nekih čelika za rad u hladnom stanju. U toplom kovanju, sve ove pojave kombinovane su sa dominantnim adhezivnim habanjem i sa toplotnim naprslinama.

Druga dimenzija u radnom veku alata je povezana sa tradicijom i kulturom proizvodnje - sa ljudskim faktorima. Zbog toga je nezavisna fabrička procena radnog veka alata uvek veoma neizvesna. U nastavku ovog rada daju se dva primera: 1. Neoprezno podmazivanje, predgrevanje ili hlađenje mogu izazvati povišenu temperaturu kalupa za kovanje što može dovesti do trajne deformacije ili toplotnog zamora, 2. Odstupanje (devijacija) temperature radnog predmeta rezultira oksidacijom sa povišenim trenjem i habanjem ili povećanjem kontaktnog pritiska, višim naponima u elementima alata a time i habanjem ili lomom. Vrste destruktivne alate u identičnim eksploatacionim okruženjima, takođe variraju. Visokopterećeni alati za hladnu ekstruziju se uvek lome, dok je habanje glavni uzrok za destruktivnu u masovnoj proizvodnji jednostavnijih radnih delova. Karakterističan odnos destruktivne alate za hladnu ekstruziju su, na primer, 80 % destruktivna prelomom ali samo 20 % zamene usled habanja. U skladu sa ovim modelom, sve vrste oštećenja su aktivne u isto vreme tokom eksploatacije alata. Habanje, hrapanje, plastična deformacija i pro-pagacija (rast) prslina su deterministički (mogu se odrediti i ograničiti), ali je započinjanje mikropukotina karakter verovatnoće.

Prema tome, put koji vodi od početnog stanja alata do dominantnog propadanja, ne zavisi samo od dizajna i specifičnih faktora eksploatacije, već od cele preistorije alata. Poklapanje ovih determinističkih i stohastičkih procesa rezultuje različitošću tipova destruktivne koja može biti veoma velika, kao što je već napomenuto.

4. PRIMENA DIFUZIONOG VANADIRANJA NA KOMPONENTAMA KALUPA

4.1. Neki teoretski aspekti

Iz aspekata prikazanih u prethodnom poglavlju ovog rada, jasno je da ne postoji opšti recept za povećanje radnog veka i kvaliteta alata. Svaki od uticajnih aspekata sadrži neke mogućnosti za povećanje veka trajanja alata. Zbog fabrički specifičnog karaktera radnog veka alata, različita rešenja mogu dovesti do različitih efekata u različitim fabrikama, tako da možemo formulirati iskaz: ne postoji jedinstven način povećanja radnog veka alata, postoji samo nekoliko koraka ka tom cilju. Jedan od tih koraka je površinsko ojačavanje reaktivnim slojevima karbida prelaznih metala, gde legirajući element ulazi difuzijom u osnovni materijal. Tehnologija površinskog ojačavanja, kao značajno sredstvo za poboljšanje performansi i veka trajanja kalupa,

zauzima veoma važno mesto u industriji kalupa, dobijajući veliku pažnju u inostranstvu. Karbidi prelaznih metala proučavani su zbog njihovih odličnih osobina, kao što su visoka tvrdoća, povišena temperatura topljenja, dobra hemijska i mehanička postojanost i visoka toplotna provodljivost [9]. Za druge, uobičajene, metode površinskog otvrdnjavanja čelika (npr. plameno i indukciono kaljenje) ne postoji informacija u literaturi da se koriste za kalupe za oblikovanje. To je možda usled velikog gubitka žilavosti i distorzije gravura kalupa koje ove metode mogu da izazovu.

Tvrđi 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. Tvrđi zaštitni slojevi su posebno korisni kada je abrazija dominantan mehanizam habanja. Jedno od glavnih razmatranja prilikom izbora materijala zaštitnog sloja je kvalitet veze između zaštitnog sloja i materijala kalupa. Vezivanje može biti hemijsko ili mehaničko. Hemijsko vezivanje je uzrokovano reakcijom ili difuzijom atoma između zaštitnog sloja i osnovnog materijala kako bi formiralo čvrsti rastvor na međusloju.

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

Neke od najranijih metoda za povećanje radnog veka kalupa za oblikovanje i alata za mašinsku obradu su tanke tvrde obloge i termodifuzioni postupci. Tanki tvrđi slojevi su nitridni, karbidni i karbonitridni slojevi sa debljinom od 3 do 10 μm . Oni se konvencionalno nanose hemijskom i fizičkom depozicijom iz parne faze. Hemijska depozicija može dovesti do teških distorzija obrađivanih delova a fizička depozicija zahteva skupu i komplikovanu opremu. Pored toga, usled ograničene količine difuzije koja se javlja tokom PVD postupka, postupak pokazuje slabiju adheziju obloge. Alternativna tehnika tvrdog oblaganja je termoreaktivni depoziciono/difuzioni (TRD) postupak koji funkcioniše na 1073 do 1473 $^{\circ}\text{K}$. [10]

U industriji hladnog kovanja, kvalitet proizvodni cena kalupa za kovanje značajno utiču na performanse kalupa. Iz tog razloga, činjeno je mnogo napora za poboljšanje performansi kalupa [11]. Nažalost, ispitivanja sa različitim površinskim tretmanima nisu uspela da dobiju plodonosne rezultate mnogim zemljama. U Japanskoj industriji hladnog kovanja, primetan uspeh ostvaren je zahvaljujući upotrebi dve vrste postupka oblaganja karbidom. Jedan od njih je sloj titanijum karbida (TiC) proizveden postupkom hemijske depozicije iz parne faze, koji je razvijen u zapadnoj Nemačkoj, a

zatim predstavljen u Japanu. Drugi je sloj vanadijum-karbida proizveden upotrebom rastopljenog sonog kupatila, slika 3 [5]. Ovaj proces, nazvan TD procesom, razvijenje od strane *Toyota Central Research and Development Labs of Japan*, i predstavljen različitim japanskim industrijama počevši od 1971. godine.

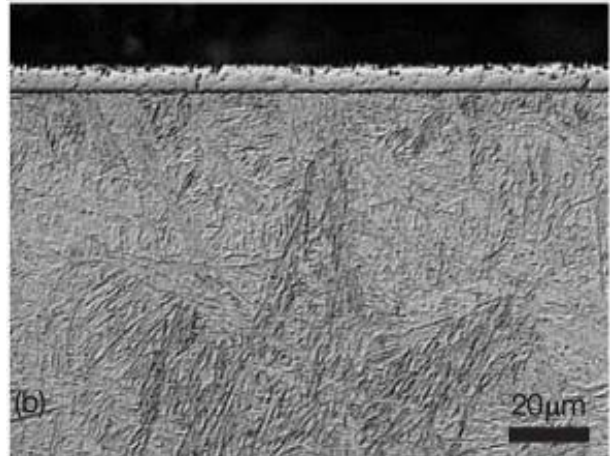


Slika 3 - Rastopljeno sono kupatilo

Trošak kovanja povezan uglavnom sa proizvodnjom alata, održavanjem alata i zastojom opreme uspešno je smanjen uvođenjem novorazvijenih metoda površinskog oblaganja, tj. tankih tvrdih slojeva i novih materijala za alate čiji su hemijski sastav i mikrostruktura dobro dizajnirani za kovačke alate. U [12] se navodi da je Japanska industrija kovanja imala mnogo koristi od oba, i tankih tvrdih slojeva i novih alatnih materijala za ovih deset do dvadeset godina. Iz [12] se saznaje da su površinska svojstva alata poboljšana putem tankih tvrdih slojeva na toliko visokom nivou, da se svake dalje modifikacije samih materijala alata u hemijskom sastavu i metodi proizvodnje ne mogu porediti. U [13] termalna difuzija (TD), termoreaktivna depozicija/difuzija (TRD) ili TD-Toyota difuzioni postupak definiše se kao visokotemperaturna obrada koja generiše površinski sloj karbida na čeliku kao i na ostalim materijalima koji sadrže ugljenik kao što su legure nikla ili kobalta. Jaki karbidoobrazujuć element (Cr, V, Nb, W ili Ti) iz reakcionog medijuma (sono kupatilo ili granulati) pri visokim temperaturama reaguje sa ugljenikom rastvorenim u austenitu stvarajući posebne karbide Cr_7C_3 , V_8C_7 , NbC, WC ili TiC, koji imaju visoku tvrdoću i visoku otpornost prema trošenju kod mehanizama trošenja abrazijom, adhezijom i tribohemijom ali niske otpornosti prema zamoru površine [14]. Najčešće proizvođen karbidni sloj je vanadijum karbid, mada se, u zavisnosti od sastava slanog kupatila mogu deponovati i drugi karbidi. Postoji ograničenje u veličini delova kalupa, zbog ograničenja u veličini slanog kupatila, što je ograničavajući faktor u primeni ovog postupka [15].

Temperatura kupatila se bira kako bi odgovarala temperaturi kaljenja čelika za kalupe. Na primer, temperatura kupatila će biti između 1000 i

1050 °C za čelik H13. Debljina karbidnog sloja se menja kontrolisanjem temperature i vremena potapanja. Za čelik H13 potrebno vreme potapanja je od 4 do 8 časova kako bi se proizveli karbidni slojevi sa zadovoljavajućom debljinom (od 5 do 10 μ m). Kalupi se zatim uklanjaju iz kupatila i hlade u ulju, rastopini soli ili na vazduhu zbog otvrdnjavanja jezgra, a zatim se otpuštaju.

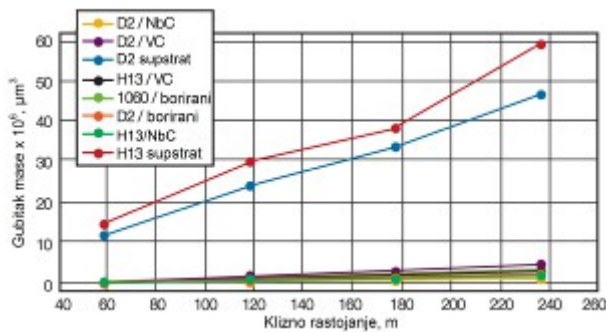


Slika 4 - Mikrografija poprečnog preseka vanadiranog uzorka čelika AISI H13

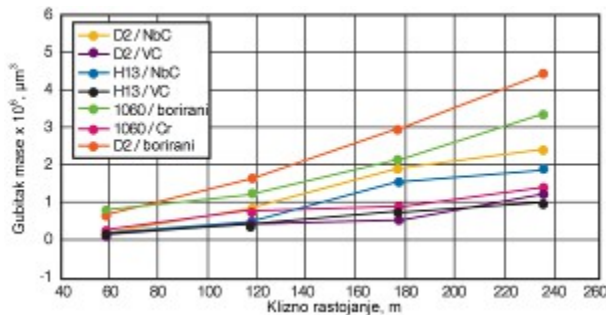
Slika 4 pokazuje poprečni presek nanešenog sloja vanadijum karbida dobijenog nakon potapanja u kupatilo sa rastopljenim boraksom sa dodatkom karbidoobrazujućih elemenata. Primetno je da osnovni materijal AISI H13 poseduje martenzitnu mikrostrukturu dok sloj pokazuje dobru jednolikost [16].

Objašnjavajući prednosti postupka, Lister [5] u svom radu navodi da sloj vanadijum karbida povećava vek trajanja alata od 5 do 30 puta više od neobloženih alata, povećanjem površinske tvrdoće uz istovremeno smanjenje koeficijenta trenja. Slično navodima u literaturi [10] on u daljoj analizi ističe da prednosti procesa nad konkurentskim slojevima hemijskog depozicionog isparenja (CVD) uključuju niže troškove investicione opreme, izostanak štetnih otrova od produkata a takođe i eliminaciju višestrukih koraka toplotne obrade. Ostajući u istom kontekstu, on dalje tvrdi da difuzioni proces takođe proizvodi delove sa poboljšanom dimenzionalnom postojanošću u odnosu na iste delove obrađene tradicionalnim tvrdim oblogama. Objasnjavajući efekte primene vanadiranja na komponentama kalupa za kovanje, u literaturi [17] se ističe kako je Venkatesan sa saradnicima utvrdio da vanadirani kalupi pokazuju manje habanje ispitivanog uzorka u odnosu na karbonitrirane i borirane. Oni su takođe primetili da vanadirani kalupi ne pokazuju tra-gove habanja nezavisno od vrste supstrata koja se koristila. Grafikon 1 pokazuje krive habanja slojeva dobijenih potapanjem u sono kupa-

tilo i postupcima u čvrstom sredstvu za ispitivane materijale.



Grafikon 1a - Krive habanja sloja karbida vanadijuma i drugih difuzionih slojeva izvedene iz ispitivanja mikro habajućom mašinom sa fiksiranom kuglom bez korišćenja abraziva



Grafikon 1b - Krive habanja samo obloženih uzoraka

Grafikon 1a pokazuje krive habanja dobijene za obložene uzorke i za osnovne materijale (supstrate) da bi se demonstrirala uspešnost svih difuzionih postupaka u povećanju otpornosti prema habanju, koji verifikuju veliko povećanje otpornosti prema habanju za sve difuziono obložene uzorke [16]. Sloj dobijen posle obrade hromiranjem (Cr) ima habajuće performanse bliske slojevima karbida vanadijuma. Habajuće performanse slojeva karbida niobijuma su snižene nego one od hromiranog sloja iako oni imaju višu tvrdoću. Ovo je verovatno zbog veće krtosti. Za bolje poređenje, na grafikonu 1b priložene su krive habanja samo obloženih uzoraka [16]. Slojevi vanadijum karbida na AISI H13 (čeliku za izradu kalupa za kovanje u toplom stanju) i D2 rezultuju najboljim habajućim performansama. Sloj jedinjenja hrom nitrida i karbida predstavlja volumen habanja blizak onom od slojeva vanadijum karbida, iako je tvrdoća sloja hroma znatno niža (1780 HV) nego onog od vanadijum karbida (2461 HV). Boridni slojevi, dobijeni potapanjem ili postupcima u čvrstom sredstvu pokazuju najnižu otpornost prema habanju među obloženim uzorcima.

Prema Matijeviću [14] radi se o postupcima koji se ne mogu jednoznačno svrstati u dve osnovne grupe (modifikovanje i prevlačenje) jer sadrže

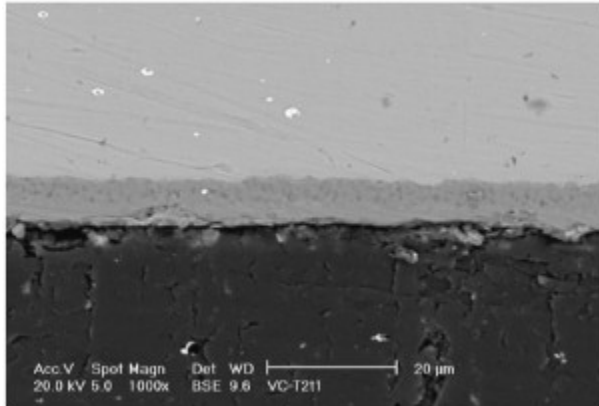
elemente procesa koji pripadaju obema grupama. To je zato što se ispod nastalog karbi-dnog sloja delimično menja hemijski sastav usled difuzije karbidoobrazujućeg elementa od površine prema unutrašnjosti i ugljenika iz unutrašnjosti prema površini. Taj deo površine je modifikovan a nad njim se nalazi karbidna prevlaka.

Objašnjavajući mehanizam rasta sloja vanadijum karbida i u vezi sa tim mikrostrukturu, morfologiju, kristalnu strukturu i tvrdoću, Haopeng je sa saradnicima [18] izveo termodifuziono vanadiranje nove vrste čelika SDC99 za kalupe za rad u hladnom stanju u kupatilu rastopljenog boraksa koje je sadržalo prahove $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (75,6 %), BaCl_2 (8,4 %), V_2O_5 (10 %) i aluminijuma (6 %). Eksperimente su izveli na 850, 900, 950 i 1000 °C za različito vreme. Mikrostrukturu i morfologiju sloja posmatrali su korišćenjem skenirajuće elektronske mikroskopije i metalografskim merenjima, analizu elemenata na površini su sproveli sa energetsom disperzivnom spektroskopijom, a kristalnu strukturu uzoraka karakterisali su sa rendgenskom strukturnom analizom. Rezultati su pokazali da sloj prevlake vanadijum karbida poseduje mnogo veću tvrdoću (oko 22 GPa) nego ona od osnovnog materijala (oko 7 GPa). Tvrdoća između sloja vanadijum karbida i osnovnog materijala polako opada ukazujući da mikrostruktura osnovnog materijala koja se graniči sa međusklopom može da obezbedi korisnu i efikasnu potporu odnosno oslonac za sloj vanadijum karbida.

U svom radu oni dalje izveštavaju da je mehanizam rasta bio nukleacija, rast početnih zrna i stvaranje zrna submikronske veličine na njima. Primetili su da kristalno zrno sloja raste u zrnima aksijalno simetričnog oblika usled uticaja aktivnosti ugljenika u osnovnom materijalu, a veličina zrna opada sa smanjenjem njegove udaljenosti od osnovnog materijala. Pored toga, u početnoj fazi rasta kristalnog zrna sloja preferencijalna orijentacija rasta kristalnih zrna transformisana je iz (200) prema (111) kristalnoj ravni. Međutim, sa uvećanjem vremena preferencijalna orijentacija rasta kristalnih zrna je bila beznačajna i ona su prerasla u zrna aksijalno simetričnog oblika.

Sa druge strane, određeni autori [19] izvršili su termoreaktivno difuziono oblaganje vanadijum karbidom komercijalnog DIN 1.2367 čelika za kalupe za rad u toplom stanju, u mešavini prahakoj se sastojala od fero-vanadijuma, amonijumhlorida, glinice i naftalena. Koristili su mešavine praha sa različitim odnosima NH_4Cl /fero-vanadijuma, i konačno smešu koja se sastojala od 40 % fero-vanadijuma, 10 % amonijum hlorida, 45 % glinice i 5 težinskih % naftalena. TRD postupak su sproveli u čeličnoj kutiji zapečaćenoj sa aluminijumskim cementom na temperaturama od 950, 1050 i 1150 °C u trajanju

od 1 do 5 h u elektrotopnoj peći, praćen normalnim hlađenjem na vazduhu. Karbidne slojeve su karakterisali mikrostrukturnom analizom, rendgenskom difrakcijom (XRD), analizom mikrotvrdoće i hemijskom analizom. Skeniranje vanadijum karbidnog sloja elektronskom mikroskopijom otkrilo je da sloj vanadijum karbida formiranog na površini supstrata ima ravnomernu debljinu preko cele površine kao i to da je sloj gust, gladak i kompaktn (zbijen). SEM mikrografija tipičnog sloja vanadijum karbida na 1150 °C i 0,5 h je prikazana na slici 5 [19].



Slika 5 - SEM mikrografija vanadijum karbida na 1150 °C i 0,5 h [19]

U svom radu oni prijavljuju da se, u zavisnosti od vremena i temperature procesa, debljina sloja vanadijumkarbida formiranog na osnovnom materijalukretala u rasponu od 2,3 do 23,2 µm. Rezultati su pokazali da je tvrdoćaslojeva vanadijum karbida bila oko 2487 HV, što je mnogo više nego ona od osnovnog materijala (576 HV). Veruje se da je to zbog prisustva tvrde faze vanadijum karbida u obloženom sloju, koji obezbeđuje ekstremno tvrdu površinu u poređenju sa onima od hromiranja, nitriranja, cementacije i karbonitriranja. Glavno ograničenje TRD obrade je to da čelični supstrat mora imati sadržaj ugljenika od najmanje 0,3 % inače debljine sloja postaju ozbiljno ograničene. Ispitivanje suvog habanja netretiranog i tretiranog DIN 1.2367 čelika za kalupe vršili su na aparaturi pinondisc (valjčić po disku) pri kliznoj brzini od 0,13 m/s. Rezultati su pokazali superiorne karakteristike pri habanju obloženih uzoraka. Takođe je proučavana kinetika vanadijum karbidne obloge ostvarene pack-metodom i aktivaciona energija za termoreaktivni difuzioni proces je procenjena na 173,2 kJ/mol.

5. ZAKLJUČCI

Različiti postupci reaktivnog oblaganja imaju sve veću primenu i u našim proizvodnim pogonima kao uobičajeni postupci obrade. Međutim, takav slučaj nije sa Toyota difuzionim postupkom. Domaći naučnici i istraživači se do sada nisu ozbiljnije

fokusirali na istraživanja koja bi za svoj cilj imala proučavanje mehanizama rasta sloja vanadijum karbida, organizacionu strukturu, otpornost prema habanju i koroziji, koeficijenta trenja i mehanizma habanja. Za razliku od nas, japanska industrija kovanja uspešno je integrisala slojeve vanadijum karbida proizvedene teromodifuzionim postupkom postizući na taj način poboljšanje radnog veka kalupa i alata, s obzirom da se vanadiranje pokazalo kao jednostavan i efikasan postupak za dobitanje tvrdih slojeva na alatnim čelicima.

Govoreći o teoriji procesa, zaključuje se da formiranje sloja vanadijum karbida predstavlja rezultat reakcije atoma vanadijuma i atoma ugljenika na povišenim temperaturama dok je njihov način vezivanja metalurško vezivanje. Alatni čelik za rad u toplom i hladnom stanju pripada grupi čelika koji se koriste u proizvodnji alata za kovanje. Posebno su interesantni zbog svoje niske cene i veoma dobrih funkcionalnih osobina, ali je njihova površina još uvek jednostavna i podložna za destrukciju habanjem pa je zato neophodno korišćenje tehnologije površinskog ojačavanja kako bi se poboljšala njihova tvrdoća i otpornost. U prilog tome poređenje performansi habanja između osnovnog materijala i sloja, izvedeno u ovom radu, pokazalo je da proizvedeni sloj vanadijum karbida u svim slučajevima pokazuje veliko povećanje otpornosti prema habanju u poređenju prema supstratima.

Saglasno sa ranijim navodima, rezultati istraživanja ovog rada potvrđuju veliki potencijal Toyota difuzionog postupka za proizvodnju slojeva visokih performansi na onim mestima gde drugi materijali otkazuju.

LITERATURA

- [1] Vilotić D, Movrin D, Milutinović M, Luža-nin O. (2010) Primena savremenih metoda u projektovanju tehnologije kovanja. IMK-14 Istraž. i razv. 35, 1-6.
- [2] Jun Z.TD salt-bath vanadizing for application of die surface strengthening in the cold. Master Dissertation. China: Wuhan Univerzity of technology.
- [3] Shivpuri R, Babu S. (2005) Die wear. Ohio: The Ohio State University S.L. Semiatin, Air Force Research Laboratory. 62.
- [4] Yang KX. (2011) Study on process of vanadizing in salt-bath on cold-work die steels. Master thesis. China: Donghua Univerzity.
- [5] Lister M. (2005) Vanadium carbide diffusion coatings for tool and die components. In: Heat Treating: Proceedings of the 23rd Heat Treating Society Conference. Pennsylvania USA: Pittsburgh. 162-166.
- [6] ASM Handbook. (2002) Forming and Forging. Volume 14. ASM International, Handbook Committee. Unated States of America. 994-995.

- [7]Lange K, Cser L, Geiger M, Kalas GAJ. (1992) Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. CIRP Annals - Manufac. Technol. 41, 667-675.
- [8]Bílik J, Pompurová A, Ridzoň M. (2012) Increasing The Lifetime of Forming Tools. In: 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering". Estonia: Tallinn University of Technology. 193-197.
- [9]Fernandes FAP, Christiansen TL, Dahl KV, Somers MAJ. (2013) Growth of Vanadium Carbide by Halide - Activated Pack Diffusion. In: Conference: Heat Treat & Surface Engineering Conference & Expo 2013. India: Chennai.
- [10]Khafri MA, Fazlalipour F. (2008) Kinetics of V (N,C) coating produced by a duplex surface treatment. Surf. and Coat. Technol. 202, 4107-4113.
- [11]Stojanović Ž, Stanisavljev S, Radosavljević S. (2013) Primena postupka vanadiranja u funkciji produženja radnog veka delova. Zašti. materij. 54, 183-188.
- [12]Arai T. (1992) Tool materials and surface treatments. Journ. of Mater. Process. Technol. 35, 515-528.
- [13]Czerwinski F. (2012) Heat treatment – conventional and novel application. Ontario: CanmetMATERIALS. Natural Resources Canada Hamilton. 275.
- [14]Matijević B, Stupnišek M. (2000) Pregled postupaka modifikiranja i prevlačenja metala. Znanstveno stručni skup s međunarodnim učešćem Toplinska obradba metala i inženjerstvo površina. Republika Hrvatska: Zagreb. 53-62.
- [15]Smith DA. (2001) Die maintenance hand-book. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn. United States of America: Michigan. 18.
- [16]Casteletti LC, Fernandes FAP, Heck SC, de Oliveira CKN, Neto-Lombardi A, Totten GE. (2009) Pack and Salt Bath Diffusion Treatments on Steels. Heat. Treat. Progr. 9, 49-52.
- [17]Babu S, Ribeiro D, Shivpuri R. (1999) Material and surface engineering for precision forging dies. Ohio: The Ohio State University. 70.
- [18]Haopeng Y, Xiaochun W, Fang Q, Longjiao Y. (2013) Study on Growth Mechanism of Salt Bath Vanadizing Coating by TD Process on SDC99 Steel. Acta Metall. Sin. 49, 146-152.
- [19]Khafri MA, Fazlalipour F. (2008) Vanadium Carbide Coatings on Die Steel Deposited by the Thermo-reactive Diffusion Technique. Journ. of Phys. and Chem. of Soli. 69, 2465-2470.

ABSTRACT

INCREASING THE EFFICIENCY OF FORGING TOOLS BY TOYOTA DIFFUSION PROCESS

In this paper is given a review of literature data about research of influence layer of vanadium carbide deposited by Toyota diffusion process on increasing of working life and quality of forging dies. Forging dies are subjected to severe adhesive and abrasive wear, high stresses and temperatures. The die surface and near surface region is subjected to the most severe conditions during forging and hence most defects and causes of failure of the dies originate from this region. Because of this, paper takes into consideration the different complicated mechanisms of wear and the destruction of the surface of tools for forging, apropos that network of various aspects which affect on the service life of the tool and by their actions causing premature removal tool from the use.

Keywords: vanadium carbide, mould forging, lifetime, wear, destruction.

Scientific paper

Received for Publication: 11. 08. 2014.

Paper corrected: 02.10.2014.

Accepted for Publication: 19. 11. 2014.