

ŽELJKO STOJANOVI¹, SPASOJE ERI²
SANJA STANISAVLJEV³, MI A UR EV⁴

Originalni nau ni 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 teškom adhezivnom i abrazivnom habanju, visokim naponima i temperaturama. Površina kalupa i region u blizini površine podvrgnuti su najtežim uslovima tokom obrade kovanjem i s toga ve ina defekata i uzroka destrukcije poti u 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 pre vremena 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 i 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, mehanizma usklopa, predmeta obrade i uslova obrade. U inak ove četiri komponente može se kategorizovati u više procesa – vezanih razmatranja, uključujući i dizajn kalupa, materijal kalupa, termičku obradu, podmazivanje, površinsku obradu i uslove obrade.

Kalup nameće geometriju deformisanom materijalu. Dizajn kalupnih šupljina (gravura) upravlja kliznim brzinama, temperaturom i pritiscima mehanizma usklopa. Posebno važna razmatranja su stanovišta habanja i destrukcije su radijusi uglova (oškova) 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 ljuške) 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 i 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 proizvođača ima sredstvo za sticanje značajnih ušteda usled poboljšanja performansi alata [5].

Poštujemo i napredno 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,
³Tehnička fakultet „M. Pupin“, Zrenjanin, ⁴Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Primljeno za publikovanje: 11. 08. 2014.

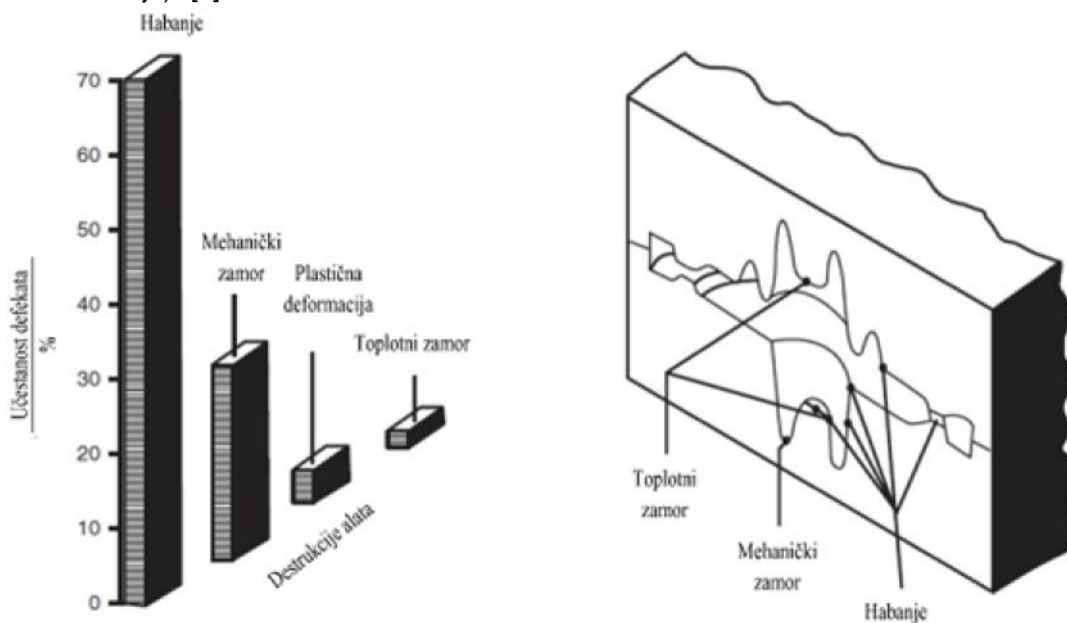
Dorađeno za publikovanje: 02. 10. 2014.

Prihvaćeno za publikovanje: 19. 11. 2014.

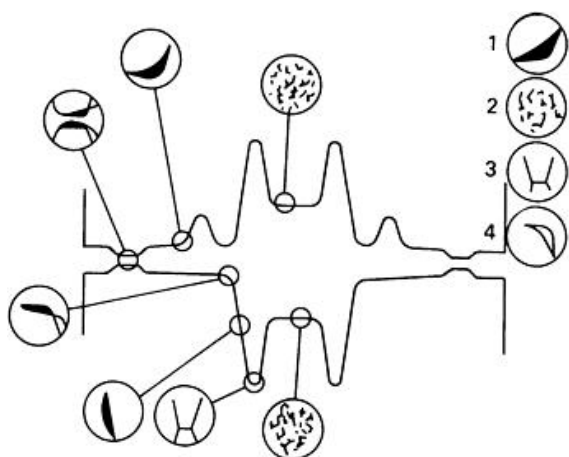
2. MEHANIZMI I MODELI HABANJA I DESTRUKCIJE KALUPA

2.1. Razlozi za uklanjanje alata iz upotrebe

Habanje materijala javlja se poma u mnogih različitim mehanizmima. 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, plastični zamor, plastična deformacija i toplotni zamor zajednički su veći procesi 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 kovanje 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 poglavju o razlozima za uklanjanje alata iz upotrebe, kao jedna od glavnih vrsta oštećenja površine kalupa u ova se habanje. To je glavni razlog za povla-

enja 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 mehanizmu 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

Naprslinje usled toplotnog zamora su glavni način destrukcije i propadanja alatnog elika 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. Periodi ni pritiskni 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, oškovi, 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 niskociklični zamor, koji je povezan sa visokim naponom i temperaturom. Niskociklični zamor je definisan kao mehanički 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 dovesti do katastrofične destrukcije. Kalupi za tešku obradive materijale ili u kojima postoje takve sa visokom koncentracijom napona zahtevaju elike sa dobrom lomnom žilavošću. Ovi elici uključuju niskolegirane elike (kao što su 6F3 i 6F7) i neke hromne elike za rad u toplom stanju (kao što je H11). Kada se koriste visokolegirani elici (kao što su H19 i H21, npr. zbog njihove otpornosti prema habanju) oni bi trebalo da budu otpušteni natvrdo u 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 izbjeći upotrebom modernih tehnika procene napona i deformacija, kao što je FEM, ali se lom usled zamora uvek javlja u visokopterećenim alatima. Lom se odvija kada zbir mehaničkih i toplotnih opterećenja pređe kritičnu vrednost. Ova vrednost nije isto 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 uzrokovane su:

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

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

1. veliki 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 mehanizama u vezi između njih. Izmena podmazivanja, na primer, ne samo da menja kontaktni mehanizam usklapanja 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 tempe-

raturu alata. Dodatna visina temperature usled trenja između predmeta obrade i alata, može podići lokalnu temperaturu površine kritično iznad temperature otpuštanja nekih eliksa 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 fabrika 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 destrukcija za identično dizajnirane alate u identičnim eksploatacionim okruženjima, tako se variraju. Visokoptereni alati za hladnu ekstruziju se uvek lome, dok je habanje glavni uzrok za destrukciju u masovnoj proizvodnji jednostavnijih radnih delova. Karakterističan odnos destrukcije za alate za hladnu ekstruziju su, na primer, 80 % destrukcija 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 propagacija (rast) prslina su deterministički (mogu se odrediti i ograničiti), ali je započinjanje mikropukotina karakteristično verovatno.

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 različitim tipovima destrukcije 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 moguće nosiće za povećanje veka trajanja alata. Zbog specifičnog karaktera radnog veka alata, različita rešenja mogu dovesti do različitih efekata u različitim fabrikama, tako da možemo formulisati 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 legiraju i 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, dobijaju i 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 eliksa (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.

Tvrdo 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. Tvrdo 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 vrstu rastvora na mekškomu.

4.2. Tribološka evaluacija osobina slojeva deponovanih na kalupe i eliksne 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 tvrdo 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 obradivih 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 °K. [10]

U industriji hladnog kovanja, kvalitet proizvoda cena kalupa za kovanje značajno utiče na performanse kalupa. Iz tog razloga, uloženo 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 i 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, razvijen je od strane *Toyota Central Research and Development Labs of Japan*, i predstavljen različitim japanskim industrijama po prvi put od 1971. godine.

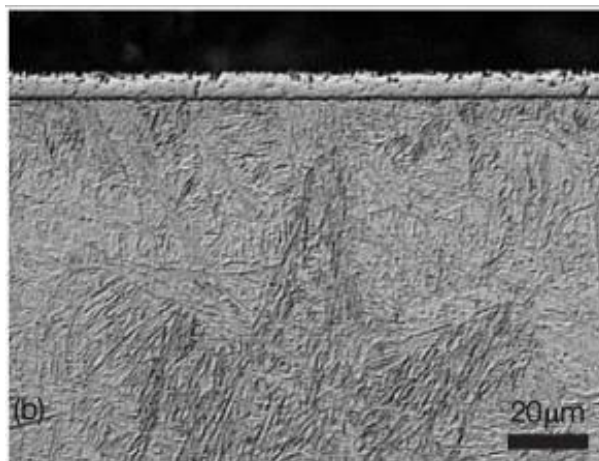


Slika 3 - Rastopljeno sono kupatilo

Trošak kovanja povezan uglavnom sa proizvodnjom alata, održavanjem alata i zastojom opreme uspješno je smanjen uvođenjem novorazvijenih metoda površinskog oblaganja, tj. tankih tvrdih slojeva i novih materijala za alate. Izi su hemijski sastav i mikrostruktura dobro dizajnirani za kovanje alata. 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 eliku kao i na ostalim materijalima koji sadrže ugljenik kao što su legure nikla ili kobalta. Jaki karbidoobrazuju i element (Cr, V, Nb, W ili Ti) iz reakcionog medijuma (sono kupatilo ili granulati) pri visokim temperaturama reaguje sa ugljenikom rastvorenim u austenitu stvaraju i 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 proizveden 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 elika za kalupe. Na pri-

mer, temperatura kupatila može biti između 1000 i 1050 °C za elik H13. Debljina karbidnog sloja se menja kontrolisanjem temperature i vremena potapanja. Za elik H13 potrebno vreme potapanja je od 4 do 8 sati kako bi se proizveli karbidni slojevi sa zadovoljavajućom debljinom (od 5 do 10 μm). Kalupi se zatim uklanjaju iz kupatila i hlade u ulju, rastopini soli ili na vazduhu zbog otvrdnjavanja jezgra, a zatim se otpuštaju.

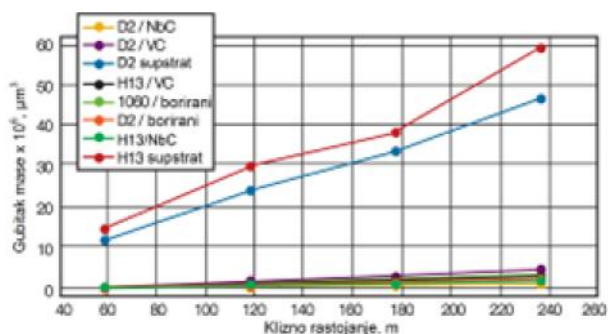


Slika 4 - Mikrografija poprečnog preseka vanadiranog uzorka elika AISI H13

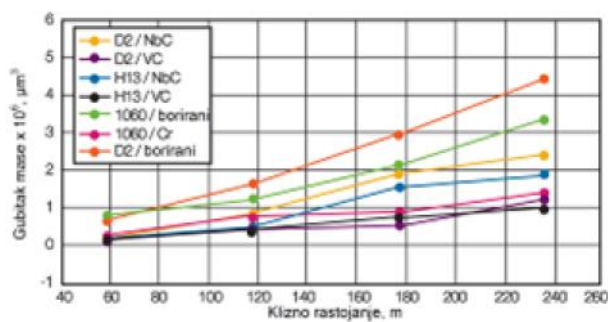
Slika 4 pokazuje poprečni presek nanešenog sloja vanadijum karbida dobijenog nakon potapanja u kupatilo sa rastopljenim boraksom sa dodatkom karbidoobrazujućih elemenata. Primetno je da osnovni materijal AISI H13 poseduje martenzitnu mikrostrukturu dok sloj pokazuje dobru jednolikost [16].

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 i 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 tako i eliminaciju višestrukih koraka toplotne obrade. Ostaju i 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 tragove habanja nezavisno od vrste supstrata koja se koristila. Grafikon 1 pokazuje krive

habanja slojeva dobijenih potapanjem u sono kupatilo i postupcima u vrstom sredstvu za ispitivane materijale.



Grafikon 1a - Krive habanja sloja karbida vanadijuma i drugih difuzionih slojeva izvedene iz ispitivanja mikro habaju om 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 habaju i performanse bliske slojevima karbida vanadijuma. Habaju i performanse slojeva karbida niobijuma su snižene nego one od hromiranog sloja iako oni imaju višu tvrdoću. Ovo je verovatno zbog veće krutosti. Za bolje poređenje, na grafikonu 1b priložene su krive habanja samo obloženih uzoraka [16]. Slojevi vanadijum karbida na AISI H13 (eliku za izradu kalupa za kovanje u toplom stanju) i D2 rezultuju najboljim habaju i 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 vrstom 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

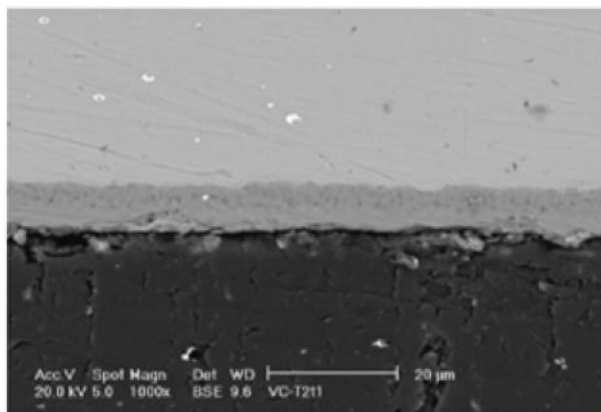
grupe (modifikovanje i prevlačenje) jer sadrže elemente procesa koji pripadaju obema grupama. To je zato što se ispod nastalog karbidnog sloja delimično menja hemijski sastav usled difuzije karbidoobrazujućeg elementa od površine prema unutrašnjosti i ugljenika iz unutrašnjosti prema površini. Taj deo površine je modifikovan a nad njim se nalazi karbidna prevlaka.

Objašnjavaju i mehanizam rasta sloja vanadijum karbida i u vezi sa tim mikrostrukturom, morfologijom, kristalnom strukturom i tvrdoćom, Haopeng je sa saradnicima [18] izveo termodifuziono vanadiranje nove vrste elika 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. Mikrostrukturom i morfologijom sloja posmatrali su korišćenjem skenirajuće elektronske mikroskopije i metalografskim merenjima, analizom elemenata na površini su sproveli sa energetskom 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 izmeću sloja vanadijum karbida i osnovnog materijala polako opada ukazujući da mikrostrukturom osnovnog materijala koja se graniči sa meću usklpom 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 po etničkim zrnima 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 povećanjem 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 elika za kalupe za rad u toplom stanju, u mešavini prahova koja se sastojala od fero-vanadijuma, amonijumhlorida, glinice i naftalena. Koristili su mešavine praha sa različitim odnosima NH_4Cl /fero-vanadijuma, i konačno mešaju koja se sastojala od 40 % fero-vanadijuma, 10 % amonijum hlorida, 45 % glinice i 5 težinskih % naftalena. TRD postupak su sproveli u eliku najkvalitetnije sa aluminijumskim cementom na

temperaturama od 950, 1050 i 1150 °C u trajanju od 1 do 5 h u elektrootpornoj peći, pri normalnim hladnjem 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 kompaktno (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 elin supstrat mora imati sadržaj ugljenika od najmanje 0,3 % ina debljine sloja postaju ozbiljno ograničene. Ispitivanje suvog habanja netretiranog i tretiranog DIN 1.2367 elika za kalupe vršili su na aparaturi pinondisc (valj i po disku) pri kliznoj brzini od 0,13 m/s. Rezultati su pokazali superiorne karakteristike pri habanju obloženih uzoraka. Tako je prouavana 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 veće u primenu i u našim proizvodnim pogonima kao uobičajeni postupci obrade. Međutim, takav slučaj nije sa Toyota difuzionim postupkom. Do-

ma i 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 termomodifuzionim postupkom postičući i na taj način poboljšanje radnog veka kalupa i alata, s obzirom da se vanadiranje pokazalo kao jednostavan i efikasan postupak za dobijanje tvrdih slojeva na alatnim elicima.

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 elik za rad u toplom i hladnom stanju pripada grupi elika 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] Viloti D, Movrin D, Milutinović M, Lužanin 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 University 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 University.
- [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. United 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, Ridzo 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, Stanisavljević 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. Znanstveni skup s međunarodnim učesnicima 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 Solids. 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.