

# Vpliv kombinacije toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja na tribološke in nosilne lastnosti hitroreznega jekla

Bojan PODGORNIK, Vojteh LESKOVŠEK, Jure JERINA

**Izvleček:** Preoblikovalna orodja so pri delovanju istočasno izpostavljena mehanskim, termičnim, kemijskim in tribološkimi obremenitvam. Tako kompleksni kontaktni pogoji zahtevajo zelo specifične mehanske, še posebej pa tribološke lastnosti kontaktnih površin. Materiali za preoblikovalna orodja morajo tako izpolnjevati najrazličnejše zahteve, ki pa niso vedno istočasno dosegljive, kot je primer visoke trdote in žilavosti, odpornosti na abrazijsko in adhezijsko obrabo itd. Cilj predstavljenega dela je bil raziskati vpliv kombinacije vakuumske toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja površine na lastnosti PM hitroreznega jekla, tako s stališča obrabne odpornosti, odpornosti na prenos preoblikovanega materiala in povečanja nosilnosti v primeru nanosa PACVD-prevleke. Rezultati kažejo, da podhlajevanje prispeva k izboljšanju abrazijske in adhezijske obrabne odpornosti hitroreznega jekla, ima pa negativen vpliv na nosilnost, ki se s povečanjem temperature avstenitizacije in v kombinaciji z nitriranjem stopnjuje.

**Ključne besede:** podhlajevanje, nitriranje, nosilnost, obraba, trenje

## ■ 1 Uvod

Pri preoblikovanju so orodja izpostavljena izredno kompleksnim kontaktnim pogojem, ki so posledica različnih vplivov (mehanska, termična, kemijska in tribološka obremenitev) [1]. Materiali za preoblikovalna orodja morajo tako izpolnjevati najrazličnejše zahteve, ki pa niso vedno istočasno dosegljive, kot je primer visoke trdote in žilavosti. Poleg mehanskih lastnosti na učinkovitost

in vzdržnost orodja vplivajo tudi tribološke lastnosti površine, vključujoč abrazijsko obrabno odpornost, nosilnost in odpornost na prenos preoblikovanega materiala. Z uporabo različnih procesov in parametrov toplotne obdelave vplivamo na mikrostrukturo jekla, s čimer lahko njegove mehanske in tribološke lastnosti prilagajamo izbrani aplikaciji [2].

V zadnjem desetletju je bil posvečen precejšen poudarek raziskavam vpliva nizkotemperaturne toplotne obdelave na lastnosti orodnih jekel [3–5]. Podhlajevanje ni zamenjava za dobro toplotno obdelavo, kot se velikokrat napačno sklepa, temveč dopolnilni proces konvencionalne toplotne obdelave pred popuščanjem [4]. Poleg tega, da podhlajevanje zagotavlja dimenzijsko stabilnost materiala, naj bi izboljšalo tudi

abrazijsko obrabno odpornost [3, 5], odpornost na utrujanje [6] in povečalo trdoto in trdnost materiala [5]. Glavni razlog izboljšanja lastnosti materiala je v popolni transformaciji zaostalega avstenita v martenzit in precipitaciji finih h-karbidov v popuščeni martenzitni osnovi [7].

Druga možnost modifikacije kontaktne površine orodij, ki se že uspešno uporablja za izboljšanje obrabne odpornosti, je uporaba kemo-termičnega poboljšanja (cementacija, nitriranje, ...) [8] ali nanos trdih zaščitnih prevlek [9]. Pri tem izstopa nitriranje v plazmi, ki omogoča tvorjenje površinskih plasti z odličnimi tribološkimi lastnostmi [10, 11], ki poleg povečanja trdote zagotavljajo tudi dobro obrabno odpornost, nizek koeficient trenja, predvsem pa povečano odpornost

Izr. prof. dr. Bojan Podgornik, univ. dipl. inž., prof. dr. Vojteh Leskovšek, univ. dipl. inž.; oba Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana  
Jure Jerina, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

na prenos preoblikovanega materiala [12]. V primeru trdih zaščitnih prevlek, nanosenih s PVD- ali PACVD-tehnologijo, pa povzroča dodatno težavo nosilnost podlage. Zaradi velike razlike v trdoti osnovnega materiala in prevleke kakor tudi majhnih debelin prevlek neustrezna nosilnost podlage privede do takojšnjega pokanja in luščenja prevleke. Z združevanjem različnih postopkov modifikacije podlage bi lahko združili njihove pozitivne lastnosti in s tem izboljšali mehanske, nosilne in tribološke lastnosti preoblikovalnih orodij.

Cilj predstavljenega dela je bil raziskati vpliv kombinacije vakuumske toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja površine na lastnosti PM hitroreznega jekla tako s stališča obrabne odpornosti in odpornosti na prenos preoblikovanega materiala kot tudi s stališča povečanja nosilnosti v primeru nanosa PACVD-prevleke.

## ■ 2 Eksperimentalni podatki

### 2.1 Material

V predstavljeni raziskavi je bilo uporabljeno komercialno hitrorežno jeklo S390 Microclean jeklarne Bohler, izdelano po postopku metalurgije prahov (PM) s sledečo kemijsko sestavo (wt. %): 1,47 % C, 0,54 % Si, 0,29 % Mn, 0,023 % P, 0,014 % S, 4,83 % Cr, 1,89 % Mo, 4,77 % V, 10,05 % W in 8,25 % Co. Vzorci v

obliki ploščic ( $\varnothing$  20 mm x 9 mm) in cilindrov ( $\varnothing$  10 mm x 100 mm) so bili izrezani iz valjanih in mehko žarjenih palic, površinsko brušeni in polirani na  $R_a \approx 0,1 \mu\text{m}$ .

### 2.2 Priprava vzorcev

Pregled uporabljenih parametrov in kombinacij vakuumske toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja v plazmi je podan v tabeli 1. Po izdelavi so bili vsi vzorci najprej toplotno obdelani v horizontalni vakuumski peči. Predgrevanju na temperaturo 1050 °C je sledilo segrevanje (25 °C/min) na temperaturo avstenitizacije 1130 °C (skupina A) oz. 1230 °C (skupina B), držanje vzorcev na temperaturi avstenitizacije do 6 minut in kaljenje v enakomernem toku dušika pri tlaku 5 barov do temperature 80 °C. Po kaljenju je bila ena serija vzorcev posamezne skupine trojno popuščana (3 x 2h) pri temperaturi 540 °C. Druga serija je bila dvojno popuščana (2 x 2h; 540 °C), čemur je sledilo dveurno nitriranje v plazmi pri 520 °C. Tretja in četrta serija vzorcev sta bili podhlajeni, nato pa ali enojno popuščeni ali nitrirani v plazmi. Po toplotni obdelavi je bila površina vseh vzorcev ponovno polirana na vrednost  $R_a \approx 0,1 \mu\text{m}$ .

Podhlajevanje je bilo izvedeno z nadzorovanim potapljanjem izbranih vzorcev (tabela 1) v tekoči dušik za 25 oz. 40 ur. Na drugi strani je bilo dveurno nitriranje v plazmi izvedeno pri temperaturi 520 °C, absolutnem tlaku 3,3 hPa in plinski

mešanici 95 vol. %  $\text{H}_2$  in 5 vol. %  $\text{N}_2$ . Z namenom določitve vpliva parametrov in kombinacije posameznih procesov kemo-termične obdelave na nosilnost podlage je bil po en vzorec vsake skupine (A1–B6) oplasčen z večplastno TiCN-prevleko debeline  $\sim 2 \mu\text{m}$  in trdote 3000 HV, ki je bila nanosena s PACVD-postopkom pri temperaturi 510 °C.

### 2.3 Tribološki preizkusi

Vpliv parametrov in kombinacije vakuumske toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja v plazmi na odpornost PM hitroreznega jekla S390 na prenos nerjavnega jekla AISI 304 (350 HV) je bil določen na napravi Load-scanner [13], ki omogoča zvezno povečevanje obremenitve med preizkusom. Pri tem vsaka točka vzdolž kontakta ustreza točno določeni obremenitvi. Preizkusi odpornosti na prenos nerjavnega jekla so bili izvedeni v pogojih suhega drsnega kontakta ( $T = 20 \text{ °C}$ ), pri drsni hitrosti 0,01 m/s in območju obremenitve med 50 in 600 N. Odpornost na prenos nerjavnega jekla je bila določena z zasledovanjem koeficienta trenja in analizo kontaktnih površin ter določitvijo kritičnih obremenitev začetka prenosa ter tvorjenja plasti prenesenega materiala.

Abrazijska obrabna obstojnost raziskovanega PM hitroreznega jekla je bila določena pri izmeničnem drsenju prav tako v pogojih suhega drsnega kontakta in pri sobni temperaturi. Z namenom osredotočenja

**Tabela 1.** Parametri toplotne obdelave, podhlajevanja in nitriranja v plazmi

Oznaka	Avstenitizacija		Podhlajevanje		Popuščanje [°C/h]	Nitriranje v plazmi [°C/h]
	Temp. [°C]	Čas [min]	Temp. [°C]	Čas [h]		
A1	1130	6	/	/	540/540/510/2h	/
A2	1130	6	/	/	540/540/2h	520/2h
A3	1130	6	-196	25	540/2h	/
A4	1130	6	-196	25	/	520/2h
A5	1130	6	-196	40	540/2h	/
A6	1130	6	-196	40	/	520/2h
B1	1230	2	/	/	540/540/510/2h	/
B2	1230	2	/	/	540/540/2h	520/2h
B3	1230	2	-196	25	540/2h	/
B4	1230	2	-196	25	/	520/2h
B5	1230	2	-196	40	540/2h	/
B6	1230	2	-196	40	/	520/2h

raziskave zgolj na obrabo hitroreznega jekla je bila kot protimaterial uporabljena oscilirajoča kroglica  $Al_2O_3$  s premerom 10 mm. Obrabni preizkusi so bili izvedeni pri povprečni drsni hitrosti 0,02 m/s (frekvenca 5 Hz in amplituda 2,4 mm), začetnem Hertzevem kontaktnemu tlaku 1,3 GPa ( $F_N = 10$  N) in celotni drsni poti 30 m. Rezultati so bili ovrednoteni glede na volumen obrabe raziskovanega hitroreznega jekla.

Tudi nosilnost oplaščenih vzorcev PM hitroreznega jekla S390 je bila določena na napravi Load-Scanner. V tem primeru je bil kot protimaterial uporabljen poliran WC-valj, trdote ~2000 HV. Preizkusi so bili ponovno izvedeni v pogojih suhega drsnega kontakta pri temperaturi 20 °C in drsni hitrosti 0,01 m/s. Z namenom določitve kritične obremenitve nastanka razpok oz. porušitve TiCN-prevleke je bila obremenitev povečana na območje med 500 in 4000 N.

Vsi preizkušanci so bili pred preizkusi očiščeni v ultrazvočni kopeli etanola in posušeni na zraku.

### 3 Rezultati

#### 3.1 Mikrostruktura

Mikrostruktura raziskovanega PM hitroreznega jekla po posamezni kombinaciji kemo-termične obdelave (tabela 1) je prikazana na *sliki 1*, vrednosti pripadajočih trdot površine pa so zbrane v *tabeli 2*. Po kaljenju s temperature avstenitizacije 1130 °C in trojnem popuščanju (vzorec A1) je mikrostruktura sestavljena iz popuščenega martenzita in enakomerno razporejenih finih neraztopljenih evtektičnih karbidov tipa MC (sivi in črni) in  $M_6C$  (beli) s povprečnim premerom 1,2  $\mu m$  (*slika 1a*). S povišanjem temperature avstenitizacije na 1230 °C (vzorci B1–B3) dosežemo podobno

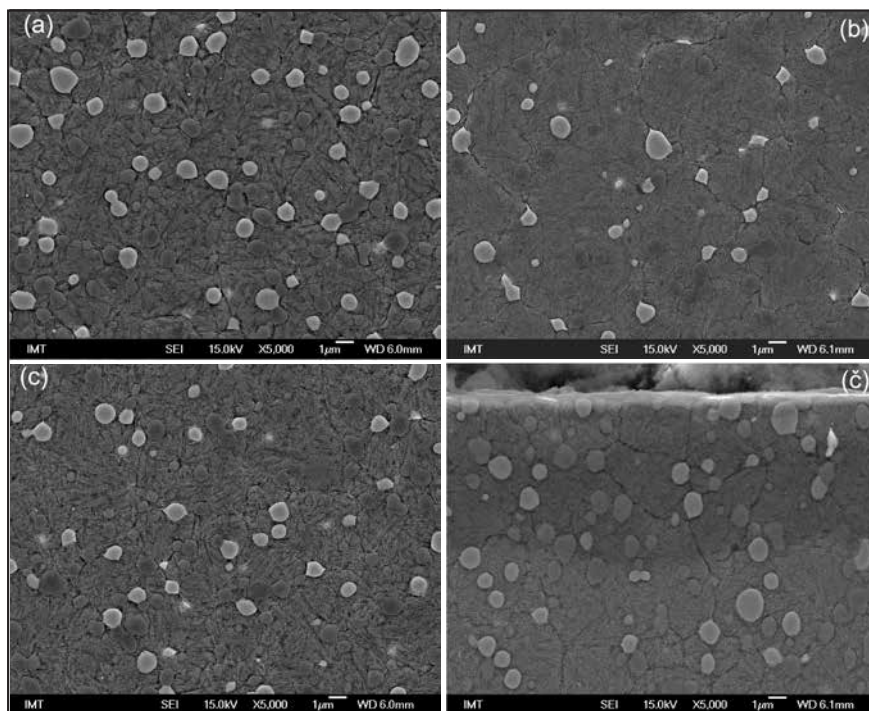
finozrnato martenzitno mikrostrukturo z enakomerno porazdelitvijo finih neraztopljenih evtektičnih karbidov in brez proevtektoidnih karbidov, raztopljenih po mejah primarnih avstentnih zrn. Kljub vsemu pa v primerjavi z nižjo temperaturo avstenitizacije (1130 °C) višja temperatura zmanjša količino in velikost (< 1,0  $\mu m$ ) neraztopljenih evtektičnih karbidov (*slika 1b*).

S kombinacijo podhlajevanja in enojnega popuščanja (vzorci A3, A5 in B3, B5) dosežemo zelo podobno mikrostrukturo popuščenega martenzita in neraztopljenih evtektičnih karbidov. Vendar pa, v primerjavi s trojnim popuščanjem, 25-urno podhlajevanje v tekočem dušiku privede do nastanka finejše igličaste martenzitne mikrostrukture (*slika 1c*) in povečanja trdote površine s 66,8 na 67,0 HRc pri skupini, kaljeni z nižje temperature avstenitizacije (skupina A), in s 66,7 celo na 68,0 HRc pri skupini z višjo

temperaturo avstenitizacije (skupina B). Z daljšanjem časa podhlajevanja se ohranja igličasta martenzitna mikrostruktura, poveča pa se trdota površine, kot je razvidno iz *tabele 2*.

Po nitriranju je na površini raziskovanega PM hitroreznega jekla ~65  $\mu m$  debela difuzijska plast, nismo pa zasledili znakov spojinske cone ali razpok (*slika 1d*). Z nitriranjem v plazmi se je trdota površine skupine vzorcev A, kaljenih z nižje temperature avstenitizacije, povečala z 965  $HV_{0,1}$  na ~1340  $HV_{0,1}$ , pri skupini B pa z 952  $HV_{0,1}$  na ~1400  $HV_{0,1}$ . Po drugi strani pa kombinacija podhlajevanja in nitriranja v plazmi nima praktično nikakršnega vpliva na mikrostrukturo jedra ali trdoto površine (*tabela 2*).

Kot je razvidno iz *tabele 2*, kombinacija višje temperature avstenitizacije, podhlajevanja in/ali nitriranja v plazmi daje višje trdote površine raziskovanega hitroreznega jekla.



**Slika 1.** Mikrostruktura vakuumsko toplotno obdelanega, podhlajenega in nitriranega PM hitroreznega jekla S390: a) A1, b) B1, c) A3 in č) A4

**Tabela 2.** Trdota površine po vakuumski toplotni obdelavi, podhlajevanju in nitriranju

	Oznaka	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Trdota	HRc	66,8		67,0		67,1	
	$HV_{0,1}$	964 ± 17	1338 ± 41	966 ± 27	1364 ± 46	1342 ± 12	1342 ± 12
	Oznaka	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	HRc	66,7		68,4		68,5	
	$HV_{0,1}$	952 ± 22	1383 ± 25	984 ± 23	1428 ± 44	1405 ± 23	1401 ± 38

### 3.2 Odpornost na prenos nerjavnega jekla

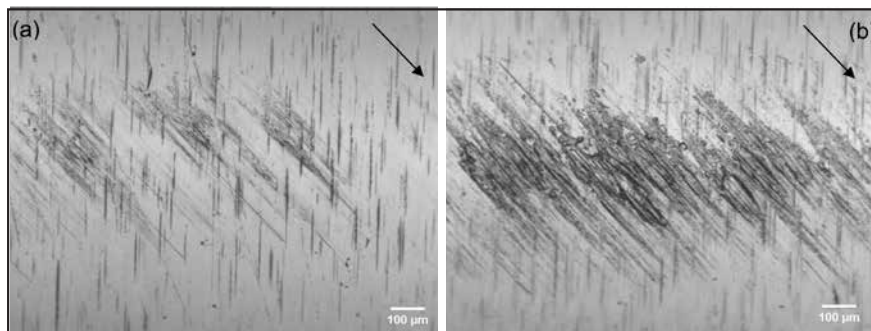
Odpornost PM hitroreznega jekla S390 na prenos obdelovanega materiala smo določili na podlagi kritične obremenitve, pri kateri zasledimo prve znake prenosa nerjavnega jekla na površino jekla S390 (slika 2a), in obremenitve, pri kateri se prične tvoriti debelejši sloja prenesenega materiala (slika 2b). V primeru trojnega popuščanja (vzorec A1) smo prve znake prenosa nerjavnega jekla zasledili pri obremenitvi 200 N, tvorjenje povezanega sloja prenesenega materiala pa pri obremenitvi nad 350 N. Podobne rezultate zasledimo pri obeh temperaturah avstenitizacije, 1130 °C (vzorec A1) in 1230 °C (vzorec B1), kot je razvidno s slike 3.

Na drugi strani s podhlajevanjem (vzorci A3, A5, B3 in B5) dosežemo boljšo odpornost na prenos materiala raziskovanega hitroreznega jekla. Kritični obremenitvi začetka prenosa in tvorjenja povezanega sloja sta se pri vzorcu, podhlajevanem 25 h (A3), povečali na 210 N in 390 N, s podaljšanjem časa podhlajevanja na 40 h (vzorec A5) pa celo na 260 N in 470 N (slika 3). Boljše rezultate, dobljene pri daljšem času podhlajevanja, je moč pripisati bolj fini igličasti martenzitni mikrostrukturi.

Po pričakovanju je tudi nitiranje v plazmi izboljšalo odpornost raziskovanega hitroreznega jekla na prenos nerjavnega jekla. V primerjavi z nenitriranim vzorcem A1 se je kritična obremenitev začetka prenosa nerjavnega jekla z nitiranjem (A2) povečala na 230 N in kritična obremenitev tvorjenja povezanega sloja na 370 N. Po drugi strani pa kombinacija nitiranja v plazmi s podhlajevanjem (A4, A6, B4, B6) privede celo do poslabšanja odpornosti na prenos nerjavnega jekla. Pri tem daljši časi podhlajevanja pomenijo tudi do 30 % slabše rezultate (slika 3).

### 3.3 Obrabna odpornost

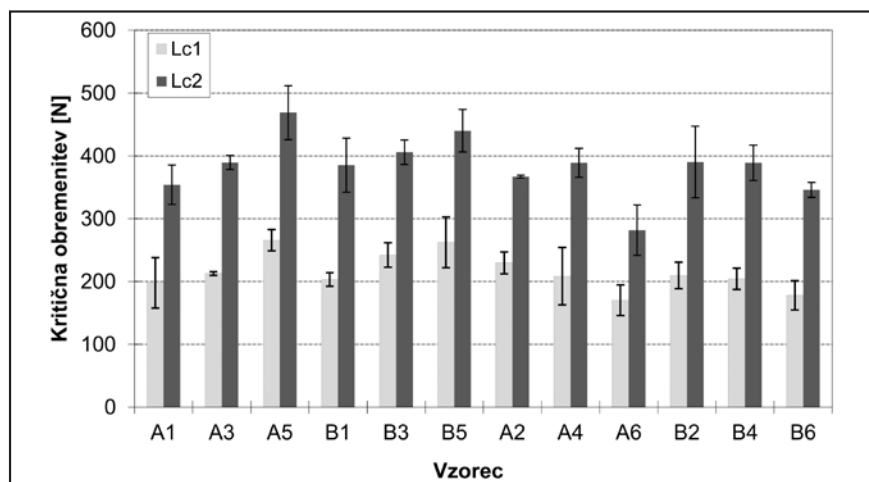
Slika 4 prikazuje abrazijsko obrabno odpornost toplotno obdelanega in nitiranega PM hitroreznega jekla S390. V primeru vakuumске toplotne obdelave in trojnega popuščanja (A1



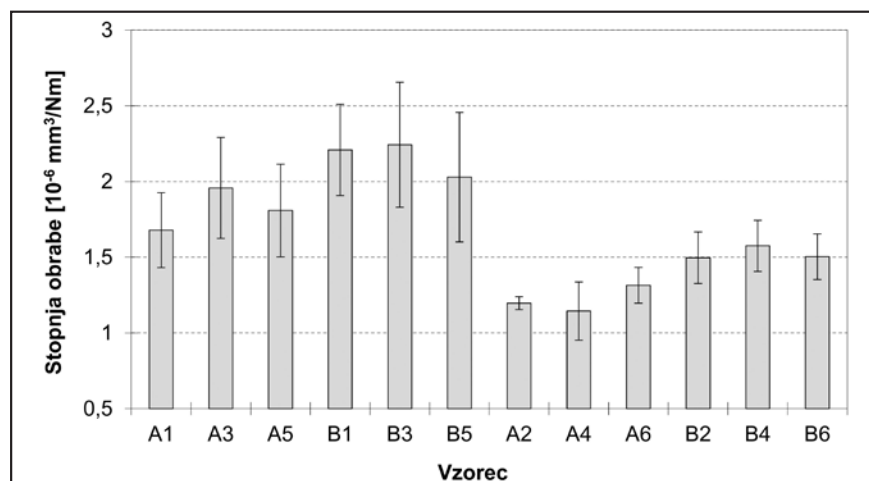
**Slika 2.** Primer (a) pričetka prenosa in (b) tvorjenja povezane plasti nerjavnega jekla na površini PM hitroreznega jekla S390

in B1) je stopnja obrabe raziskovanega hitroreznega jekla po 30 m suhega drsnega kontakta med  $1,7$  in  $2,2 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm. Pri tem višja temperatura avstenitizacije, ki daje mikrostrukturo z manjšo količino neraztopljenih evtektičnih karbidov, vodi do večje stopnje obrabe. Po drugi strani uporaba podhlajevanja (A3, A5, B3, B5) bistveno ne vpliva na abrazijsko obrabno odpornost PM hitroreznega

jekla S390. Kljub vsemu pa povečanje trdote površine, ki jo dosežemo s podaljšanjem časa podhlajevanja s 25 na 40 ur, privede do zmanjšanja stopnje obrabe, ki pa je v primerjavi s trojnim popuščanjem manjše od 10 % (slika 4). Občutno zmanjšanje stopnje obrabe dosežemo z nitiranjem jekla v plazmi. Preko tvorjenja površinske nitridne plasti in povečanja trdote površine se je stopnja obra-



**Slika 3.** Kritična obremenitev pričetka prenosa ( $L_{c1}$ ) in nastanka povezane plasti nerjavnega jekla ( $L_{c2}$ ) na površini vakuumsko toplotno obdelanega, podhlajenega in/ali nitiranega hitroreznega jekla



**Slika 4.** Vpliv kombinacije toplotne obdelave na koeficient trenja in stopnjo obrabe

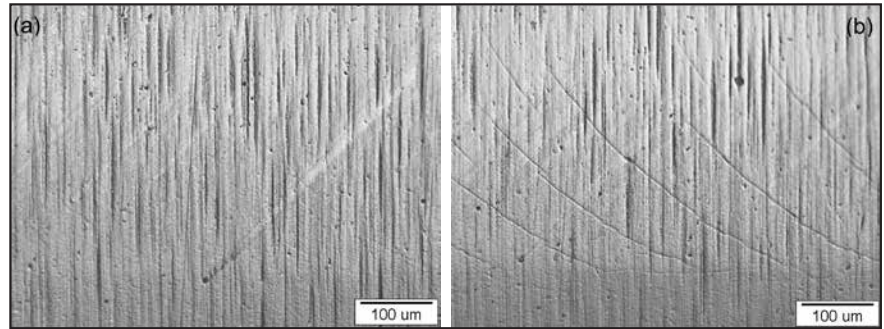
be raziskovanega hitroreznega jekla zmanjšala na zgolj  $1,1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  (slika 4). V primerjavi z nenitriranim jeklom je nitriranje v plazmi zmanjšalo tudi vpliv temperature avstenitizacije na tribološke lastnosti, pri čemer pa višja temperatura avstenitizacije še vedno pomeni večjo obrabo. Po drugi strani kombinacija podhlajevanja in nitriranja v plazmi ne kaže nikakršnega pozitivnega učinka v smislu povečanja abrazijske obrabne obstojnosti, kot je razvidno s slike 4.

### 3.4 Nosilnost podlage

Vpliv toplotne obdelave podlage na nosilne lastnosti PM hitroreznega jekla S390 in sposobnost zagotavljanja ustrezne podpore trdi TiCN-prevleki je bil določen z analizo razpok na površini prevleke. Pri tem smo določili kritično obremenitev nastanka prvih razpok (slika 5a) in pričetka njihovega zgoščevanja (slika 5b), prikazanih na sliki 6, ter dolžino in gostoto razpok pri obremenitvi 3500 N (slika 7).

V primeru podlage, kaljene s temperature avstenitizacije 1130 °C, in trojnega popuščanja (A1) so se prve razpoke v prevleki TiCN pojavile pri obremenitvi 2200 N, večja gostota le-teh pa nad 2500 N. Skupna dolžina razpok pri 3500 N je bila 1,5 mm z gostoto 5,7 razpok/mm. S podhlajevanjem (vzorca A3 in A5) se sama nosilnost hitroreznega jekla ni spremenila, povečali pa sta se gostota in dolžina razpok, predvsem pri krajšem času podhlajevanja. Negativen vpliv podhlajevanja na nosilnost hitroreznega jekla je precej bolj izrazit pri višji temperaturi avstenitizacije (vzorci B1, B3 in B5). Medtem ko dvig temperature avstenitizacije s 1130 °C na 1230 °C (A1–B1) poveča nosilnost za ~20 %, s kombinacijo podhlajevanja pade kritična obremenitev nastanka razpok pod 2000 N (slika 6), dolžina in gostota razpok pa se povečata za več kot 30 % (slika 7). Pri tem ima daljši čas podhlajevanja na splošno manj negativen vpliv.

Nasprotno od pričakovanega privede nitriranje površine PM hitroreznega jekla do poslabšanja nosilnih lastnosti hitroreznega jekla S390, tako v smislu znižanja kritične obremenitve pričetka pokanja TiCN-prevleke



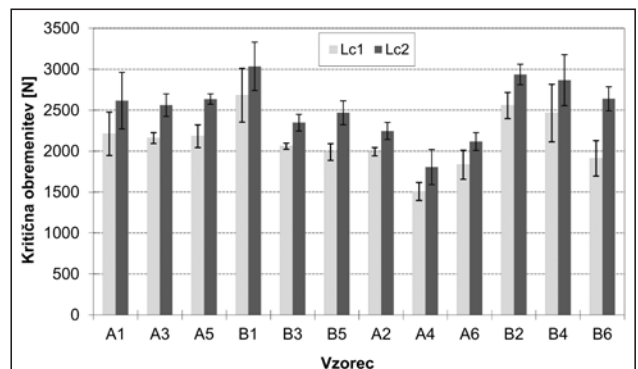
**Slika 5.** Primer (a) nastanka razpok v prevleki TiCN in (b) povečevanje njihove gostote in dolžine

(< 2000 N), predvsem pa povečanja dolžine in gostote razpok (slika 7). Tudi v primeru nitriranja višja temperatura avstenitizacije (B2) izboljša nosilnost raziskovanega hitroreznega jekla, medtem ko jo kombinacija podhlajevanja precej poslabša.

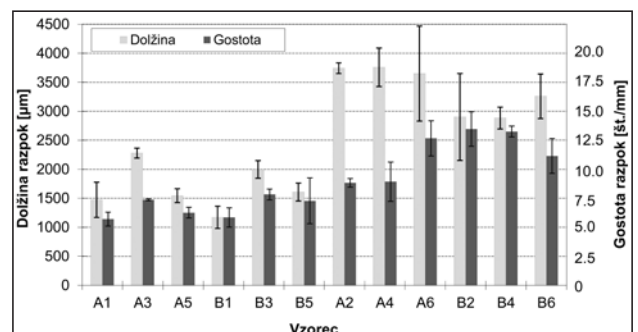
### 4 Diskusija

Z zmanjšanjem števila neraztopljenih eutektičnih karbidov višja temperatura avstenitizacije (A→B) zniža trdoto površine hitroreznega jekla in s tem njeno abrazijsko obrabno odpornost (slika 4). Kljub vsemu to ne vpliva na odpornost površine proti prenosu preoblikovanega materiala (slika 3), zaradi boljše duktilnosti pa se izboljša nosilnost podlage (sliki 6 in 7). Pri tem je potrebno opozoriti, da povišanje temperature avstenitizacije lahko privede do povečanja hrapavosti površine [14], kar nato negativno vpliva na odpornost površine na prenos preoblikovanega materiala, lahko pa poslabša tudi oprijemljivost prevleke. Vključitev procesa podhlajevanja v toplotno obdelavo hitroreznega jekla daje bolj fino zrna to mikrostrukturo z višjo trdoto površine in s tem boljšimi protiobrabnimi la-

stnostmi, predvsem odpornostjo na prenos preoblikovanega materiala. Izboljšanje protiobrabnih lastnosti je bolj izrazito pri daljših časih podhlajevanja, ki dajejo tudi nekoliko višje trdote površine (A3→A5, B3→B5). Po drugi strani podhlajevanje negativno vpliva na nosilnost hitroreznega jekla, ki pa se s podaljšanjem časa podhlajevanja zmanjša. S tvorjenjem trde površinske plasti z nizkim koeficientom trenja nitriranje v plazmi močno izboljša tako protiobrabne lastnosti kot tudi odpornost PM hitroreznega jekla na prenos preoblikovanega materiala. Nasprotno pa zaradi zmanjšanja duktilnosti nitriranje pre-



**Slika 6.** Vpliv kombinacije toplotne obdelave podlage na pričetek nastanka ( $L_{c1}$ ) in zgoščevanja razpok ( $L_{c2}$ ) v TiCN-prevleki



**Slika 7.** Dolžina in gostota razpok v TiCN-prevleki pri obremenitvi 3500 N

cej poslabša nosilnost površine, če je ta prekrita s trdo PACVD-prevleko TiCN. Kljub prednostim, ki jih nudijo posamezni postopki toplotne ali kemo-termične obdelave, kombinacija podhlajevanja in nitriranja izniči prednosti posameznega postopka in v končni fazi privede do precejšnjega poslabšanja tako triboloških (sliki 3 in 4) kot tudi nosilnih lastnosti hitroreznega jekla (sliki 6 in 7).

## ■ 5 Zaključki

Temperatura avstenitizacije predstavlja izredno pomemben parameter toplotne obdelave hitroreznega jekla. S povišanjem temperature avstenitizacije se zmanjšata količina in velikost evtektičnih karbidov, s tem pa poslabša abrazijska obrabna odpornost. Po drugi strani to nima bistvenega vpliva na adhezijsko obrabno odpornost, močno pa izboljša nosilne lastnosti PM hitroreznega jekla. Podhlajevanje PM hitroreznega jekla omogoča doseganje bolj fino-zrnate martenzitne mikrostrukture, ki izboljša tribološke lastnosti površine, predvsem njeno odpornost na prenos preoblikovanega materiala. Daljši časi podhlajevanja na splošno dajejo boljše tribološke lastnosti, lahko pa negativno vplivajo na nosilnost hitroreznega jekla.

Najboljše tribološke lastnosti PM hitroreznega jekla dosežemo z uporabo nitriranja v plazmi. Po drugi strani pa nitriranje v plazmi zelo negativno vpliva na nosilno sposobnost PM hitroreznega jekla pri nanosu trdih zaščitnih PACVD-prevlek.

Prednosti procesa podhlajevanja oz. nitriranja v plazmi se z njuno kombinacijo izničijo, kar v končni fazi privede do precejšnjega poslabšanja nosilnih in triboloških lastnosti PM hitroreznega jekla.

## Literatura

- [1] J. S. Schery, Tribology in metalworking – Friction, Lubrication and Wear, Oxford publishing, 1984.
- [2] V. Leskovšek, M. Kalin, J. Vižintin, Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS, Vacuum, Vol. 80 (2006) 507–518.
- [3] D. N. Collins, Cryogenic treatment of tool steels, Adv. Mater. Process., (1998) H23–H29.
- [4] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan, A. Kalanidhi, Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels, Cryogenics, Vol. 41 (2001) 149–155.
- [5] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini, K. H. Stiasny, Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 118 (2001) 350–355.
- [6] P. Johan Singh, S. L. Mannan, T. Jayakumar, D. R. G. Achar, Fatigue life extension of notches in AISI 304L weldments using deep cryogenic treatment, Eng. Failure Analysis, Vol. 12 (2005) 263–271.
- [7] F. Meng, Role of h-carbide precipitation in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment, ISIJ Int., Vol. 34 (1994) 205–210.
- [8] M. B. Karamis, An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13), Wear, Vol. (1991) 331–342.
- [9] B. Podgornik, S. Hogmark, O. Sandberg, Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel, Wear, Vol. 261 (2006) 15–21.
- [10] B. Podgornik, J. Vižintin, Wear resistance of pulse plasma nitrided AISI 4140 and A355 steels, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 315 (2001) 28–34.
- [11] M. Mubarak Ali, S. Ganesh Sundara Raman, S. D. Pathak, R. Gnanamoorthy, Influence of plasma nitriding on fretting wear behaviour of Ti-6Al-4V, Trib. Int., Vol. 43 (2010) 152–160.
- [12] B. Podgornik, S. Hogmark, Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools, J. Mater. Process. Technol., Vol. 174 (2006) 334–341.
- [13] B. Podgornik, S. Hogmark, J. Pezdinik, Comparison between different test methods for evaluation of galling properties of surface engineered tool surfaces, Wear, Vol. 257 (2004) 843–851.
- [14] B. Podgornik, V. Leskovšek, J. Vižintin, Influence of deep-cryogenic treatment on tribological properties of P/M high-speed steel, Mater. Manuf. Process., Vol. 24 (2009) 734–738.

### Effect of combined vacuum heat treatment, deep-cryogenic treatment and plasma nitriding on tribological and load-carrying properties of high-speed steel

**Abstract:** Forming tools and dies are simultaneously exposed to mechanical, thermal, chemical and tribological loading. Such complex contact conditions require well defined and specific mechanical and especially tribological properties of the contact surfaces. The aim of the present work was to investigate the effect of combining vacuum heat treatment, deep-cryogenic treatment parameters and plasma nitriding on the performance of powder-metallurgy (P/M) high-speed steel. Special emphasis was put on abrasive wear resistance and resistance to galling under dry sliding conditions as well as load-carrying capacity of P/M high-speed steel when coated with a PACVD coating. Test results show that deep-cryogenic treatment contributes to improved abrasive wear resistance and better galling properties of P/M high-speed steel, however it has negative effect on load-carrying capacity. Degradation of load-carrying capacity was found to exaggerate with austenitizing temperature and plasma nitriding.

**Key words:** deep-cryogenic treatment, plasma nitriding, load-carrying capacity, wear, friction