

OPTIMIRANJE VAKUUMSKE TOPLLOTNE OBDELAVE REZILNIH ORODIJ IZ HITROREZNIH JEKEL

V. Leskovšek¹, B. Ule¹, A. Rodič¹, D. Lazar², M. Pogačnik²

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 61001 Ljubljana, tel.: (061) 151-161

²Plamen Kroga

OPTIMISATION OF VACUUM HEAT TREATMENT OF CUTTING DIES MADE FROM HSS

ABSTRACT

Manufacturing of cutting dies from HSS M2 (AISI), is one of the most important vacuum heat treatment operations with uniform high-pressure gas quenching. The importance of optimal heat treatment, is the possibility of making the optimum combination of the basic characteristics of cutting dies made from HSS for the given of working part/cutting die combination.

Three different austenitization temperatures, and five different tempering temperatures were chosen. Some of the cutting dies were cold treated and coated with TiN by PVD, to produce the correct hardness balance, toughness, cutting properties and wear resistance in the finished tool. The result of the present investigation is important for the optimisation of vacuum heat treatment of different tools made from HSS which are under tensile impact stress during exploitation. For them optimal combination of hardness and fracture toughness are decisive.

POVZETEK

Pri izdelavi orodij iz hitroreznih jekel je ena najpomembnejših operacij vakuumska toplotna obdelava. Pomen pravilne toplotne obdelave je, da lahko vplivamo na izbiro optimalne kombinacije osnovnih karakteristik orodij iz hitroreznih jekel za določeno kombinacijo del/orodje.

Za toplotno obdelavo hitroreznih jekel uporabljamo različne agregate. V zadnjem času vse bolj pogosto uporabljamo vakuumske peči s homogenim ohlajanjem pod visokim tlakom N₂, zaradi reševanja ekoloških problemov ter boljših lastnosti vakuumsko toplotno obdelanih rezilnih orodij, izdelanih iz hitroreznega jekla. Izbrali smo tri različne temperature avstenitizacije in pet različnih temperatur popuščanja. Polovico vseh obrezilnih matic smo podhladili, polovico celokupnega števila matic iz posamezne skupine smo še dodatno površinsko obdelali, in sicer z nanosom TiN plasti po PVD postopku, s tem smo želeli doseči optimalno razmerje med trdoto, žilavostjo, rezilnimi lastnostmi in obrabno obstojnostjo.

Rezultati raziskave so pomembni za optimiranje vakuumske toplotne obdelave različnih orodij, izdelanih iz hitroreznega jekla, ki so med delom pod udarno-natezno obremenitvijo. Za trajnost takšnih orodij je odločilnega pomena pravilna izbira optimalne kombinacije trdote in lomne žilavosti.

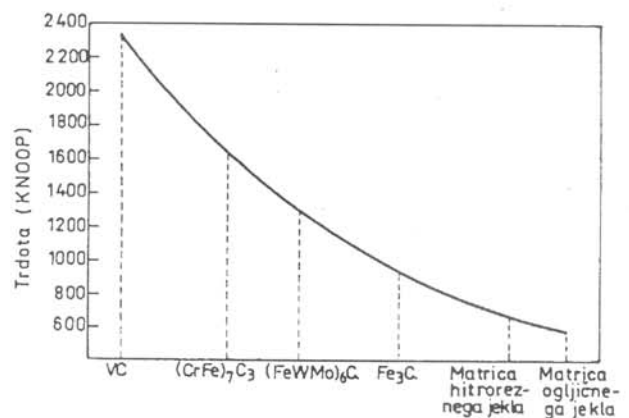
1 UVOD

Pri izdelavi orodij iz hitroreznih jekel je ena najpomembnejših operacij toplotna obdelava. Pomen pravilne toplotne obdelave je, da lahko vplivamo na izbiro optimalne kombinacije osnovnih karakteristik orodij iz hitroreznih jekel za določeno kombinacijo del/orodje, kot so:

- odpornost proti obrabi
- trdnost rezilnega robu
- tlačna meja plastičnosti (kriterij za trdoto)
- žilavost.

Odpornost proti obrabi

V splošnem je odpornost proti obrabi odvisna od trdote, vrste karbidov in razmerja med karbidi in matico. Odpornost proti obrabi pri hitroreznih jeklih se povečuje sorazmerno s celotno prostornino karbidov in tudi njihovo trdoto. V diagramu na sliki 1 so podane približne vrednosti trdot za nekatere karbide /1/.



Sl. 1. Primerjalne vrednosti trdot karbidov, ki jih najdemo pri orodnih jeklih /1/

Kot je razvidno iz diagrama, ima vanadijev karbid VC trdote od 2200 do 2400 HV, zato je njegov vpliv na odpornost proti obrabi pri hitroreznih jeklih največji.

Poškodbe trenjskih površin, ki jih najdemo na rezilnih orodjih, lahko razvrstimo v štiri osnovne tipe obrabe /2-4/:

- zaradi površinske utrujenosti materiala
- adhezivna
- abrazivna
- korozijska.

Tem tipom obrabe pripadajo sekundarni znaki, kot so:

- jamičavost (pitting)
- kontaktna korozija
- erozija.

Razumljivo je, da odpornost proti obrabi ne moremo označiti kot materialno lastnost, marveč le kot lastnost kompleksnega tribološkega sistema. Kljub temu pa v splošnem velja, da je prevladujoči tip obrabe rezilnih orodij odvisen od vrste materiala orodja, predvsem od njegovih fizikalnih (mehanskih, toplotnih) in kemijskih lastnosti pri povišani temperaturi.

Podhlajevanje

Številni avtorji /1, 5-8/ so dokazali, da podhlajevanje, ki sledi kaljenju, transformira zaostali avstenit. V praksi pa priporočajo za visoko legirana jekla, med katera spadajo tudi hitrorezna, enourno podhlajevanje po kaljenju, in sicer med prvim in drugim popuščanjem v trdnem ogljikovem dioksidu ali tekočem dušiku pri temperaturah med -75°C in -196°C . Podhlajevanje omogoča, da jeklo doseže M_f temperaturo, pri kateri se transformira zaostali avstenit /9/, kar povečuje efekt sekundarnega utrjevanja, s tem pa doseganje maksimalne trdote in odpornosti proti obrabi ter maksimalno dimenzijsko stabilnost orodja.

Trdnost rezilnega robu

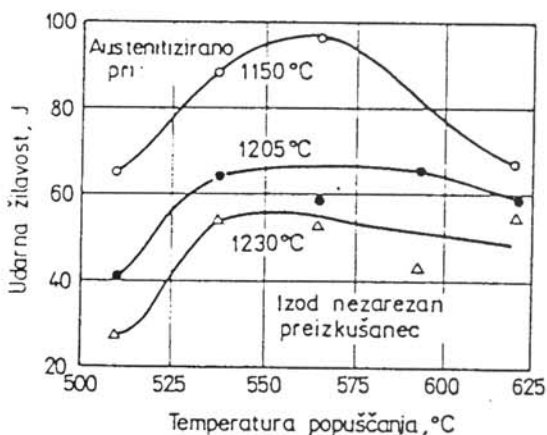
Pri rezilnih orodjih je pomembna lastnost trdnost rezilnega robu, ki predstavlja odpornost materiala proti zaokroževanju ali deformaciji rezilnih robov. Največjo ostrino rezilnega robu in s tem podaljšano uporabnost rezilnega orodja iz hitroreznega jekla zagotavljajo drobni in enakomerno razporejeni karbidi v osnovni matrici. Segregacije in veliki karbidi pa imajo negativen vpliv na stabilnost rezilnih robov.

Tlačna meja plastičnosti $R_{e(0,2)}$

Kriterij, ki odloča o izbiri trdote rezilnega orodja iz hitroreznega jekla, je tlačna meja plastičnosti $R_{e0,2}$. Če je ta prenizka, obstaja nevarnost plastične deformacije rezilnih orodij.

Žilavost

Lomi, makro- in mikrookruški so vzrok propadanja rezilnih robov. Sposobnost jekla, da se upira tem pojavom, pa je poznana kot njegova žilavost. Le-ta je omejena z napakami v jeklu (razporeditev karbidov v trakove, vključki žindre itd.). Pri obremenitvah se lahko pojavijo okoli napak koncentracije napetosti, ki so tako velike, da pride do loma orodja, razen v primeru, ko se koncentracije napetosti lahko sprostijo pri lokalnem plastičnem toku na mikropodročju. Lastnosti osnovne matrice (žilavost, trdota), ki je podvržena plastičnemu toku, lahko s toplotno obdelavo spreminjamo znotraj širokega območja, ki je omejeno z napakami v materialu.



Sl. 2a. Vpliv temperature avstenitizacije in popuščenja na udarno žilavost jekla /10/

Diagrama na slikah 2a in 2b nazorno prikazujeta vpliv temperature avstenitizacije in temperature popuščenja na udarno žilavost in trdoto za hitrorezno jeklo Č.7680 /10/.

To pomeni, da varnost orodij, izdelanih iz jekel z visokimi trdnostmi ter relativno niskimi žilavostmi, ne more biti določena le s klasičnim trdnostnim izračunom.

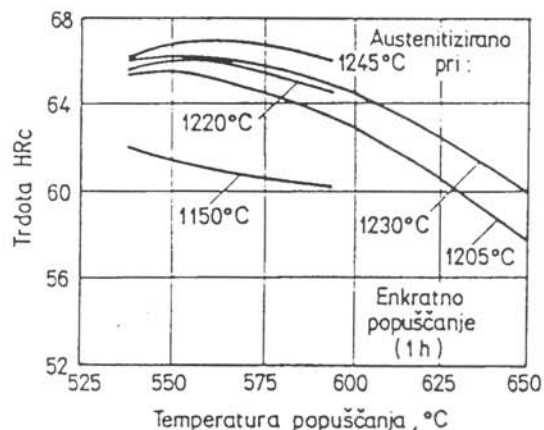
Zato je nujno potrebno kvantificirati žilavost jekla še bolj natančno in ne zgolj empirično, kot je to pri klasičnem Charpyjevemu preizkusu, kjer je mogoča le določitev krhke oz. žilave narave loma, in še to le za omejeno področje debelin.

V ta namen so bili razviti različni koncepti mehanike loma /11, 12/. V takoimenovani linearni elastomehaniki loma, kjer je obnašanje vse do loma povsem elastično, je merilo za porušitev faktor kritične intenzitete napetosti K_{Ic} , ki ga imenujemo tudi lomna žilavost materiala. Lomna mehanika torej povezuje napetosti v materialu z velikostjo napak ter lomno žilavostjo materiala, zato prav merjenje lomne žilavosti postaja tako zelo pomembno za rezilna orodja, izdelana iz hitroreznih jekel.

Postopki rutinskega določevanja lomne žilavosti so že vrsto let standardizirani /11, 12/. Navadno uporabljamo standardne CT preizkušance (Compact Tension).

Preizkušanec z utrujenostno razpoko v korenu zareze (maksimalni faktor intenzitete napetosti v fazi utrujanja ne sme preseči 60% veljavne lomne žilavosti jekla) "statično" obremenjujemo in pri tem uporabljamo odvisnost med obremenitvijo ter odpiranjem ustja razpoke CT preizkušanca /11, 12/.

Pogosto pa se zgodi, da debeline rezilnih orodij bodisi niso zadostne, da bi iz njih izdelali veljavne CT preizkušance, bodisi ni na voljo ustreznih naprav za merjenje lomne žilavosti, ali pa potrebujemo le okvirne vrednosti za K_{Ic} za prve grobe ocene dopustnih napak na rezilnih orodjih. V vseh takšnih primerih si lahko pomagamo z različnimi korelacijskimi formulami za računanje lomne žilavosti jekel /11, 12/.

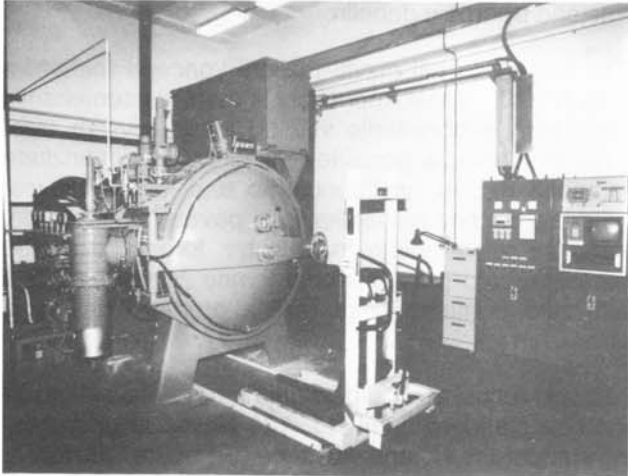


Sl. 2b. Vpliv temperature avstenitizacije in pogojev popuščenja na trdoto jekla Č.7680 /10/

2 EKSPERIMENTALNI DEL Z REZULTATI

Za toplotno obdelavo hitroreznih jekel uporabljamo različne agregate. V zadnjem času vse pogosteje uporabljamo vakuumske peči s homogenim hlajenjem pod visokim tlakom (slika 3), predvsem zaradi reševanja ekoloških problemov. Poleg tega dosegamo tudi boljše lastnosti vakuumsko toplotno obdelanih rezilnih orodij, kot so:

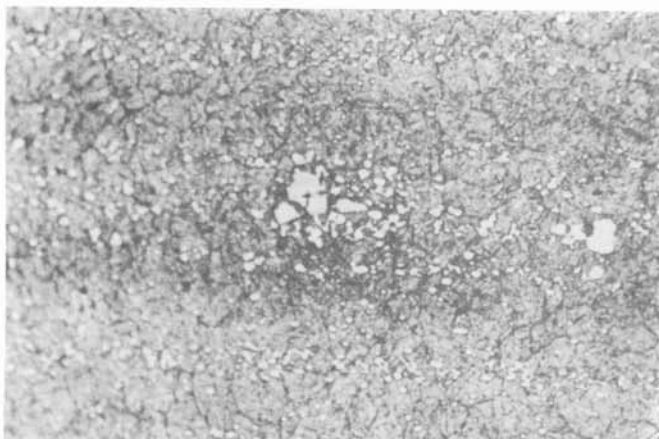
- visoka kakovost površine
- minimalne dimenzijske spremembe
- čista, neoksidirana in nerazogljivena površina.



Sl. 3. Visokotemperaturna vakuumska peč s homogenim hlajenjem in visokim tlakom, proizvajalec IPSEN, tip VTC 324-R

Pri našem eksperimentalnem delu smo se omejili na študij optimiranja toplotne obdelave 88 obrezilnih matric, izdelanih iz jekla VEW S 600 (Č. 7680) - slika 4.

Osem skupin obrezilnih matric, cilindričnih nateznih preizkušancev z zarezo po obodu in matricam podobnih etalonov, izdelanih iz iste palice, smo toplotno ob-



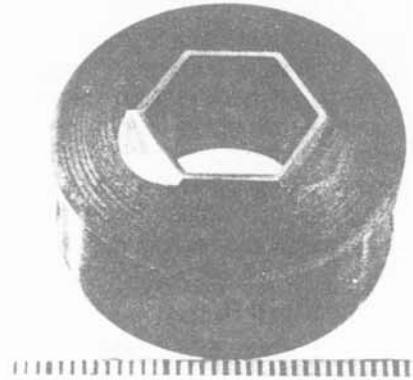
500x

nital

Sl. 5. Struktura: Karbidi in popuščeni martenzit z velikostjo zrna 16 SG, T_A 1150°C

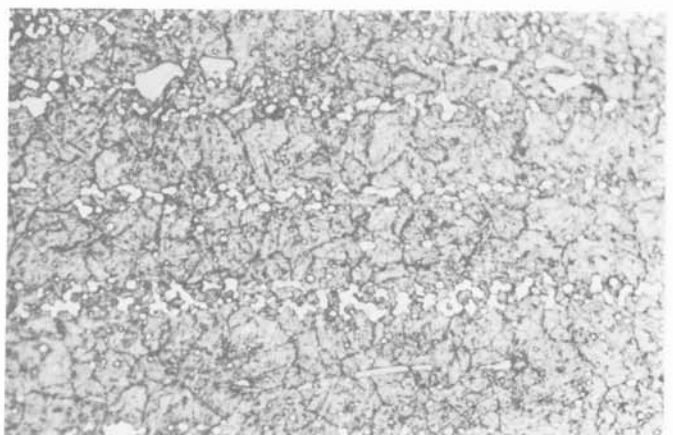
delali v vakuumski peči IPSEN VTC 324-R (tabela 1) tako, da so se vse obrezilne matrice, cilindrični natezni preizkušanci in etaloni uvrstili v tri razrede trdot, in sicer v 61±1, 64±1 in 66±1 HRC. Polovico tako toplotno obdelanih matric smo med obema popuščanjema še 1 uro podhlajevali v propanolu pri -95°C.

Ena polovica celokupnega števila matric iz vsake posamezne skupine pa je bila še dodatno površinsko obdelana, in sicer z nanosom 2 nm debele plasti TiN po PVD tehnologiji.



Sl. 4. Obrezilna matrica

Matricam podobne etalone smo metalografsko pregledali in ugotovili, da imajo vsi vzorci, kaljeni s temperature avstenitizacije 1150°C, velikost avstenitnega zrna 16-17 po SG (Snyder-Graff) - slika 5. Zrna so dokaj homogena. Na vzorcih, kaljenih s temperature avstenitizacije 1230°C, smo namerili velikost zrna 11-12 SG - slika 6. Velikost in razporeditev karbidov je bila pri



500x

nital

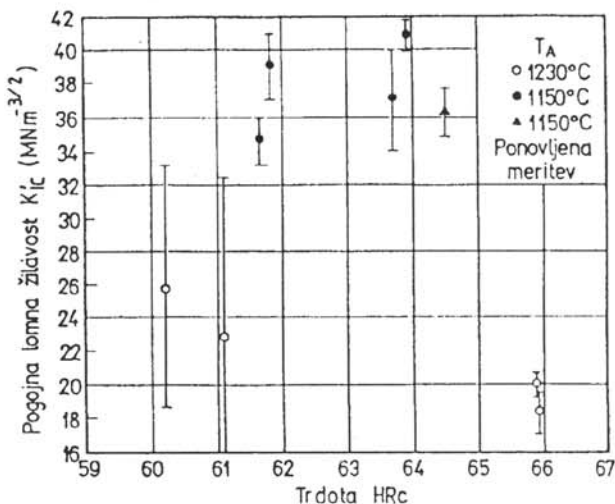
Sl. 6. Struktura: Karbidi in popuščeni martenzit z velikostjo zrna 12 SG, T_A 1230°C

vseh vzorcih enaka, saj so bili vzeti iz ene in iste metalurške taline in vroče plastično preoblikovani na isto dimenzijo. Karbidi so bili v vzdolžni smeri razporejeni v trakove, velikost karbidnih zrn pa je bila od 1 do 20 nm.

S strukturno rentgensko analizo smo določili odstotek zaostalega avstenita, katerega delež je bil na vseh vzorcih pod 1 vol. %. Določili pa smo tudi tetragonalnost martenzita in našli opazno tetragonalnost ($>1 \times 10^{-3}$) le pri vzorcih, ki so bili med obema popuščanjema podhlajeni v propanolu, 1 uro pri -95°C (tabela 1).

Rezultati mehanskih preizkusov kažejo, da se izmerjene trdote na obrezilnih maticah in cilindričnih preizkušancih z zarezo po obodu za določevanje lomne žilavosti dobro ujemajo (tabela 1). Lomno žilavost K_{IC} smo skušali določiti z nateznim preizkusom cilindričnih preizkušancev z zarezo po obodu. Ker je pri tako visokih trdotah cilindrični preizkušavec močno zarezno občutljiv, nam tokrat s pulziranjem ni uspelo ustvariti utrujenostne razpoke v korenu zareze /11,12/. Rezultati merjenja lomne žilavosti - lahko jo imenujemo pogojna lomna žilavost K'_{IC} - so zbrani v tabeli 1.

Ugotovimo lahko, da podhlajevanje obrezilnih matic med obema popuščanjema le malo vpliva na pogojno lomno žilavost hitroreznega jekla, saj jo poslabša le za približno 10% (tabela 1). Veliko bolj kot podhlajevanje pa na pogojno lomno žilavost tovrstnega jekla vpliva temperatura avstenitizacije - slika 7.



Sl. 7. Odvisnost med trdoto obrezilnih matic ter pogojno lomno žilavostjo K'_{IC} . Temp. avstenitizacije je navedena kot parameter.

Visoka temperatura avstenitizacije namreč pomeni večja avstenitna zrna ter zato poslabšano pogojno lomno žilavost jekla, četudi so s primerno izbiro temperatur popuščanja sicer dosežene sorazmerno nizke trdote.

Težave, ki smo jih imeli pri ustvarjanju utrujenostne razpoke v korenu zareze, zahtevajo, da bo v bodoče bolj smiselno določevanje lomne žilavosti po metodi, ki jo za hitroreznega jekla in karbidne trdine uporablja H.F. Fishmeister /12/. Lomna žilavost K_{IC} namreč postaja pomembna materialna lastnost, ki v linearni elastomehaniki povezuje napetosti v materialu z velikostjo različnih napak, ki so v materialu vedno prisotne.

Vse obrezilne matrice smo preskusili na obrabo na najboljše možni način, tj. neposredno na stroju Boltmaker 5/6"-5-52 pri obrezovanju glav vijakov M8 iz jekla ČSN 12122.

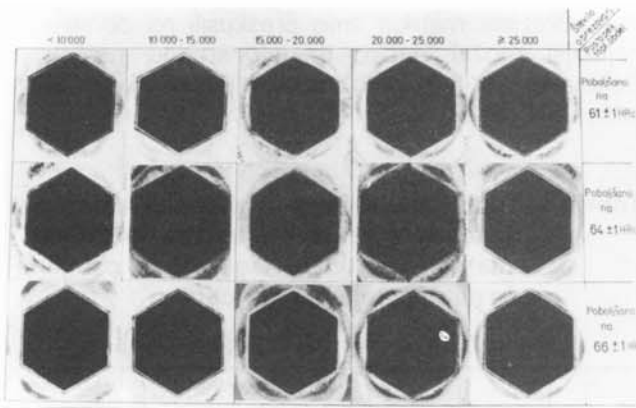
Tabela 1. Toplotna obdelava, mehanske lastnosti in tetragonalnost martenzita obrezilnih matic (podatki se nanašajo na oslojene in na neoslojene matrice).

Skupina matic	Temp. avstenitizacije ($^{\circ}\text{C}$)	Trdota matic HRc (x)	Trdota nateznih preizkušancev (x) HRc	Pogojna lomna žilavost K'_{IC} ($\text{MN m}^{-3/2}$)	Tetragonalnost $\text{tx}10^{-3}$	Opombe
01	1150	60,8-63,3		39±2	< 1	2 matrice uničeni
	2x565 $^{\circ}\text{C}$	(61,8)	(61,7)			
02	1150	60,7-63		34,6±1,4	1,9	propanol -95 $^{\circ}\text{C}$
	2x565 $^{\circ}\text{C}$	(61,7)	(62)			1h; 2 matrice
03	1150	62,7-64,7		40,9±0,9	< 1	
	2x530 $^{\circ}\text{C}$	(63,9)	(64)			
04	1150	63-64,5		37±4	2,5	propanol -95 $^{\circ}\text{C}$
	2x530 $^{\circ}\text{C}$	(63,7)	(63,8)			1h
05	1230	59,3-61		25,8±7,6	< 1	3 matrice uničene
	2x590 $^{\circ}\text{C}$	(60,2)	(60,7)			
06	1230	60,7-61,7		22,9±9,5	1,2	propanol -95 $^{\circ}\text{C}$
	2x590 $^{\circ}\text{C}$	(61,1)	(60,8)			1h
07	1230	65,3-66,8		20±0,2	< 1	1 matrica uničena
	2x540 $^{\circ}\text{C}$	(65,9)	(65,6)			
08	1230	65-66,5		18,3±1,1	2,3	propanol -95 $^{\circ}\text{C}$
	2x540 $^{\circ}\text{C}$	(65,9)	(65,7)			1h

Rezultate naših opazovanj obrabe rezilnih robov smo zbrali na sestavnih slikah, iz katerih je razvidna smer obrabe rezilnih robov. Iz slike 8 je razvidno, da je trajnost toplotno obdelanih matic brez TiN prevleke med 15 in 20.000 obrezi, odvisno od razreda trdote. Na sliki 9 pa so prikazane matrice, oplemenitene z nanosom TiN.

Ugotovimo lahko, da je trajnost tovrstnih matric - če jo ocenimo na metodološko enak način kot v prejšnjem primeru - med 50 in 60.000 obrezi in celo več.

Vpliv podhlajevanja na obrabno obstojnost rezilnih robov obrezilnih matric smo ugotavljali na 96 primerkih, ki so bili toplotno obdelani, kot je podano v tabeli 2.

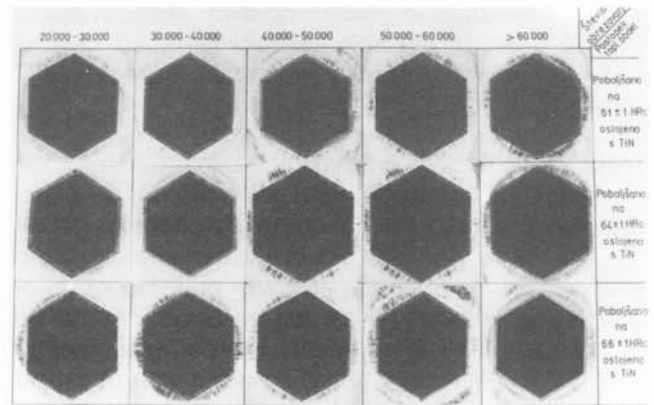


Sl. 8. Posnetki obrezilnih robov poboljšanih matric (pov. 4,3 x)

Parametri preizkušanja matric (sila rezanja, število udarcev, to je obrezovanj v enoti časa, temperatura, način mazanja itd.) so bili ves čas nespremenjeni, tako da na končni rezultat niso vplivali.

Razlike, ki smo jih ugotovili med posameznimi matricami oziroma njihovimi skupinami, lahko izvirajo le od matric samih. Po končanem preizkušanju, ki smo ga zastavili tako, da naj bi vsaka od obrezilnih matric opravila 20.000 obrezovanj, smo pregledali pod binokularjem robove tistih, ki so dejansko zdržale predpisano število obrezovanj in na njih ocenili število poškodovanih robov (tabela 2).

Rezultati preizkušanja obrezilnih matric na stroju Boltmaker 5/16"-5-S2 potrjujejo ugotovitev, da trajnost obrezilnih matric določa predvsem njihova trdota (64-66 HRc), medtem ko lomna žilavost jekla nanjo nima velikega vpliva. Iz tabele 2 je razvidno, da je 74% vseh matric opravilo predvidenih 20.000 obrezovanj, pri drugih pa je prišlo do zloma ali večje poškodbe rezilnih robov



Sl. 9. Posnetki obrezilnih robov, poboljšanih in s TiN oslojenih matric (pov. 4,3x)

zaradi napak pri dodajanju žice ali odzemanju vijakov.

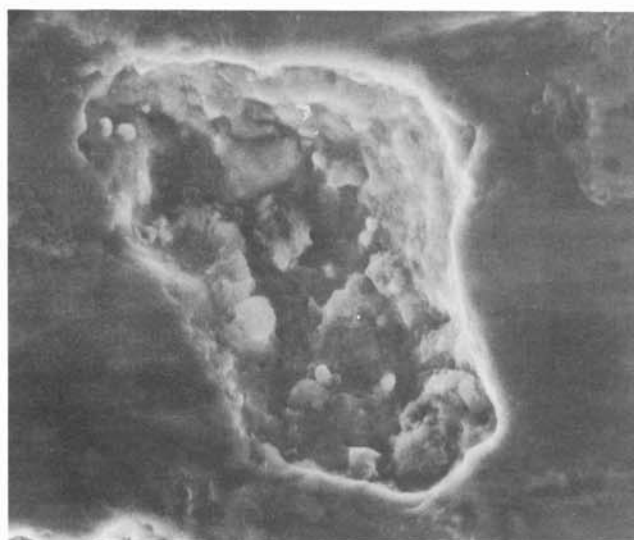
Z ocenjevanjem števila poškodovanih rezilnih robov pod binokularjem smo skušali empirično oceniti vpliv podhlajevanja na njihovo obrabno obstojnost. Kot je razvidno iz tabele 2, imamo v povprečju manjše število poškodovanih rezilnih robov na obrezilnih matricah z 20.000 obrezi, ki so bile podhlajene, v primerjavi z nepodhlajenimi. Prav tako smo ugotovili, da so poškodbe rezilnih robov manj izrazite pri obrezilnih matricah, ki so bile podhlajene, v primerjavi z nepodhlajenimi.

Tabela 2. Rezultati preizkušanja obrezilnih matric na stroju Boltmaker 5/16"-5-S2

Skupina obrezilnih matric	Toplotna obdelava	Trdota rezil. robu HV 10 x	Trdota obrez. matric HRc x	Trdota žice ČSN 12122 HB x	Število obrezilnih matric v eksploataciji	Povprečno število obrezovanj na matrico	Število obrezilnih matric, ki so zdržale 20.000 obrezovanj	Povprečno št. poškodovanih rezilnih robov na matrico (20.000 obrezovanj)
01	1170°C 2x540°C	875	64,5	186	24	17461	17	3,4
02	1170°C 540°C/-95°C/540°C	879	64,5	196	24	18796	17	2,4
03	1230°C 560°C/570°C	936	65,4	193	24	17413	17	3,4
04	1230°C 560°C/-95°C/570°C	917	65,7	190	24	19705	20	2

Obrezilne matrice propadajo v eksploataciji progresivno s časom.

Na osnovi metalografske preiskave rezilnih robov lahko začetek mehanizma obrabe rezilnih robov s TiN oslojenih obrezilnih matric pripišemo površinskemu utrujanju materiala in kasnejši abrazijski obrabi - slika 10. Začetni mehanizem obrabe rezilnih robov na teh matricah pa ni tako jasno razviden, saj zasledimo tako znake površinskega utrujanja materiala, adhezijske obrabe kot tudi abrazijo - slika 11.



Sl. 10. Mikrorelief rezilnega robu obrezilne matrice, oslojene s TiN

Odpornost proti obrabi rezilnih orodij ne moremo definirati kot materialno lastnost, marveč kot lastnost kompleksnega tribološkega sistema. Kljub temu pa v splošnem velja, da je dominanten tip obrabe rezilnih orodij odvisen od vrste materiala orodja, predvsem od njegovih fizikalnih (mehanskih, toplotnih) in kemijskih lastnosti. Zato bo mehanizem obrabe obrezilnih matric ter natančnejša študija soodvisnosti med trdoto, lomno žilavostjo hitroreznega jekla ter morebitnim vplivom povečane tetragonalnosti martenzita vsebina prihodnje raziskave.



Sl. 11. Mikrorelief rezilnega robu obrezilne matrice brez nanosa TiN

3 SKLEP

Na osnovi rezultatov, dobljenih z neposrednim preizkusom obrabe rezilnih robov obrezilnih matric, lahko sklenemo, da oslojevanje s TiN podaljša trajnost obrezilnih matric za 3-krat.

Ugotovili smo, da trajnost le-teh - neodvisno od tega, ali so bile oslojene s TiN ali ne - določa predvsem njihova trdota (64- 66 HRC), medtem ko pogojna lomna žilavost jekla na trajnost obrezilnih matric nima velikega vpliva.

Pomembno je poudariti, da ima lahko hitroreznno jeklo pri enaki trdoti tudi povsem različno pogojno lomno žilavost (tudi za faktor 2,5), kar je odvisno predvsem od temperature avstenitizacije, tj. od velikosti avstenitnih zrn - slika 7.

Podhlajevanje obrezilnih matric med obema popuščanjema ni bistveno vplivalo na trdoto jekla, na lomno žilavost jekla (10%) ter odstotek zaostalega avstenita (vol. %) v hitroreznem jeklu. Zaznaven pa je vpliv podhlajevanja na odpornost proti obrabi in s tem na trajnost podhlajenih obrezilnih matric v primerjavi z nepodhlajenimi. Zdi se, da je manjše število poškodovanih rezilnih robov in s tem večja trajnost podhlajenih matric v neki soodvisnosti z ugotovljeno povečano tetragonalnostjo martenzita.

4 LITERATURA

- /1/ R. Wilson: Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels, Mc Graw-Hill Book Company, UK
- /2/ A. Jonan: Aspect des surfaces frottantes suivant les modes de degradation et d'usure, Traitement Thermique 208-87, 87-96
- /3/ G. Colin: Les mecanismes de l'usure et du fraitement, Traite-ment Thermique 208-87, 79-86
- /4/ H. Czichos: Tribology, Elsevier scientifie publshisne companie, Amsterdam, 1978
- /5/ G. Murry: Pourquoi et comment traiter les aciers par le froid? Rappels metallurgiques, Traitement Thermique 132-79
- /6/ J.C. Rouault: Materiels de mise en oeuvre de l'azote liquide pour les traitements par le froid, Traitement Thermique 132-79
- /7/ R. Mercier: Temoignage de l'utilisation du froid dans un atelier de traitement, Traitement Thermique 132-79
- /8/ J. Berthon: Traitement par le froid des aciers rapides influence sur les qualites de coupe, Traitement Thermique 132-79
- /9/ R.L. Banerjee: Evolution de l'austenite residuelle au cours du revenu, Traitement Thermique 147-80
- /10/ Heat Treating, Metals Handbook, Ninth Edition, 4, 1981, 561-613
- /11/ B. Ule, D. Kmetič, A. Rodič: Merjenje lomne žilavosti jekel s preizkušanci malih dimenzij, Rudarsko-metalurški zbornik 1989, 3, 509-519
- /12/ H.F. Fischmeister: Toughness in High Speed Steels and Hard Metals, Specialty steels and Hard Materials, Materials Development 1982, 127