

PRESKUŠANJE ORODIJ, ZAŠČITENIH Z RAZLIČNIMI POVRŠINSKIMI OBDELAVAMI, PRI POGOJIH TOPLEGA PREOBLIKOVANJA

PERFORMING TESTS ON TOOLS PROTECTED BY DIFFERENT SURFACE TREATMENTS UNDER WARM FORMING CONDITIONS

Igor Urankar¹, Peter Panjan¹, Milan Terčelj², Radomir Turk², Miha Čekada¹,
Boris Navinšek¹

¹Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija
igor.urankar@ijs.si

Prejem rokopisa – received: 2003-03-24; sprejem za objavo – accepted for publication: 2003-07-18

Na eksperimentalni napravi Geeble 1500 smo pri pogojih toplega preoblikovanja preizkusili orodje, zaščiteno z duplex postopkom, za primerjavo pa še s toplotno obdelanim in plazemsko nitriranim orodjem. Pred preoblikovanjem in po izbranem številu udarcev smo na orodjih izmerili globinski profil mikrotrdote, hrapavost in konturo. Površino orodij smo preiskali z optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom. S toplotno obdelanim orodjem smo po 300 udarcih zaradi velike obrabe prenehali delati, medtem ko na ostalih dveh orodjih po 300 udarcih še nismo opazili poškodb. Po 1100 udarcih je bilo plazemsko nitrirano orodje precej obrabljeno, medtem ko je bilo orodje, zaščiteno z duplex postopkom, bolj ali manj nepoškodovano na čelni ploskvi. Manjše poškodbe večplastne prevleke so se pojavile le na zaokrožitvah, kjer so drsne dolžine in kontaktni pritiski največji.

Ključne besede: vroče kovanje, PVD-prevleke, plazemsko nitriranje, duplex postopek

Forming tools, improved with a duplex treatment, were tested under warm forging conditions using the Gleeble 1500 experimental apparatus. Heat-treated and plasma-nitrided tools were used for the comparison. Before forging and after a certain number of strokes, the microhardness depth profile, the roughness and the contour of all the tools were measured. The bearing surface of the tools was examined by optical and scanning electron microscopy. As the heat-treated tool was severely worn after 300 strokes, no further testing was performed on it, while on the other two types of tools we did not observe any damage after 300 strokes. After 1100 strokes the plasma-nitrided tool was very worn, while the duplex-treated tool was more or less undamaged on the frontal bearing surface. Only minor damage to the protective coating appeared at the roundings of the tool in the area of the largest sliding length and contact pressures.

Key words: hot forging, PVD coatings, plasma nitriding, duplex treatment

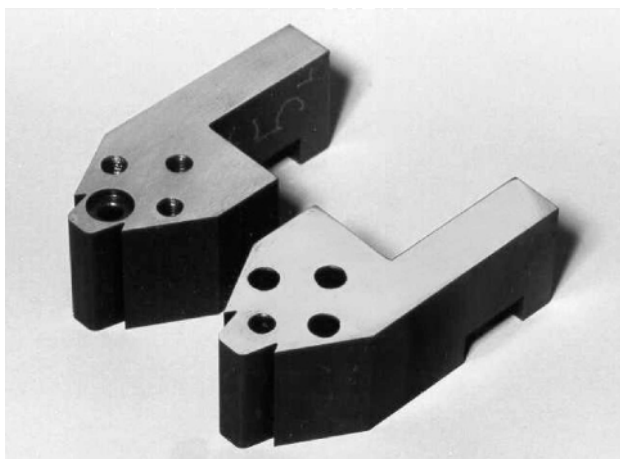
1 UVOD

Toplo kovanje je proces preoblikovanja kovinskih materialov pod visokimi pritiski nad temperaturo rekristalizacije. Kovanje v utopih je najpogosteje uporabljen postopek takšnega preoblikovanja. S tem postopkom se izdelava v Evropi več kot dva milijona ton izdelkov na leto¹. Kovani izdelki imajo veliko trdnost, žilavost in trajno nihajno trdnost. Na tak način se izdelujejo pomembni avtomobilski deli, kot so npr. ojnice v motorju, ročične gredi, pesta, zobniki.

Orodja za toplo preoblikovanje so med obratovanjem izpostavljena visokim toplotnim, mehanskim in kemičnim obremenitvam, zato se pogosto poškodujejo. Pogosto jih je potrebno obnavljati predvsem zaradi abrazijske in adhezijske obrabe. Glavni parametri preoblikovanja, ki vplivajo na obrabo orodij in s tem na njegovo vzdržljivost, so: kontaktni pritiski, temperatura na površini orodja in nastanek novih površin zaradi kemičnih reakcij. Za povečanje trajnosti orodij za toplo preoblikovanje se uporabljajo različne tehnike inženirstva površin. Najpogosteje sta v uporabi postopka plinskega²

in plazemskega nitriranja^{3,4}. Orodja lahko zaščitimo tudi z vanadiziranjem^{5,6}, boriranjem⁵, naogljčenjem površine⁴ in s prevlekami. Pripravimo jih lahko z elektrokemijskimi postopki⁷, s postopkom navarjanja⁸ ter s postopkom kemijskega nanašanja prevlek iz parne faze (CVD – Chemical Vapour Deposition)⁶. V zadnjem času je bilo narejenih tudi nekaj poskusov zaščite orodij s trdimi prevlekami, narejenimi s PVD (Physical Vapour Deposition)¹ in duplex postopki. Dupleks postopek je kombinacija plazemskega ali plinskega nitriranja in PVD trde prevleke^{1,9,10,11,12}.

Na Institutu "Jožef Stefan" so bili prvi preizkusi zaščite orodij za toplo preoblikovanje narejeni pred nekaj leti¹. Orodja, zaščitena z večplastno PVD-prevleko TiN/TiAlN in z duplex postopkom, so preskusili v industrijskih pogojih v tovarni Unior. Ugotovili so povečano obrabno obstojnost orodja za izdelavo ojnice, ki so ga zaščitili z duplex postopkom, ne pa tudi na orodju, ki je bilo zaščiteno samo s PVD večplastno prevleko TiN/TiAlN. Ker je na orodjih, ki se uporabljajo v industrijskih pogojih med preoblikovanjem težko spremljati



Slika 1: Orodje za preskušanje pri pogojih toplega preoblikovanja na eksperimentalni napravi Gleeble 1500

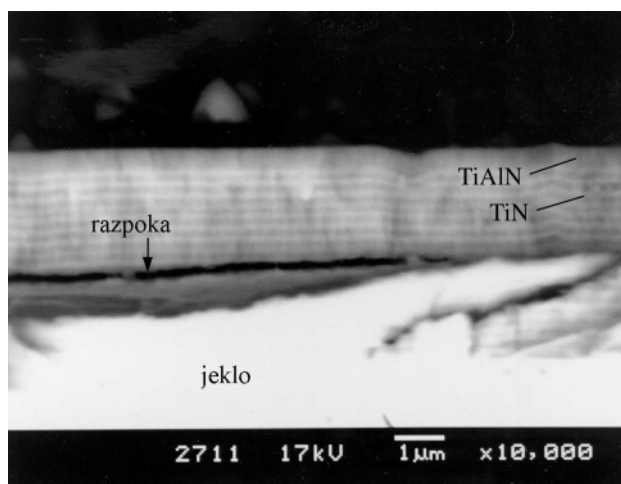
Figure 1: Tool for testing under hot-forming conditions on the Gleeble 1500 experimental device

spremembe na površini le-tega, smo se odločili, da bomo delo nadaljevali na simulatorju za toplo preoblikovanje.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Za eksperimentalno delo smo pripravili tri vrste orodja, ki smo jih testirali pri pogojih toplega preoblikovanja na napravi Gleeble 1500. Vsa orodja iz jekla Utop Mo1 so bila toplotno obdelana do trdote 48 HRC. Ena serija orodij je bila nato nitrirana v plazmi do globine 80 μm , del le-teh pa smo dodatno oplemenitili še z večplastno PVD-prevleko TiN/TiAlN.

Orodje (**slika 1**) iz jekla Utop Mo1 z dimenzijami 53 mm \times 39 mm \times 24 mm je bilo izdelano najprej do grobe oblike s postopkom frezanja, brušenja in vrtanja. Narejeno je bilo iz dveh delov. Delovna površina orodja je bila izdelana s postopkom elektroerozije. Pri elektroeroziji je



Slika 2: SEM-posnetek prereza večplastne prevleke TiN/TiAlN na orodnem jeklu Utop Mo1, nitriranem v plazmi

Figure 2: Cross-sectional SEM micrograph of the coating TiN/TiAlN on plasma-nitrated tool steel H11

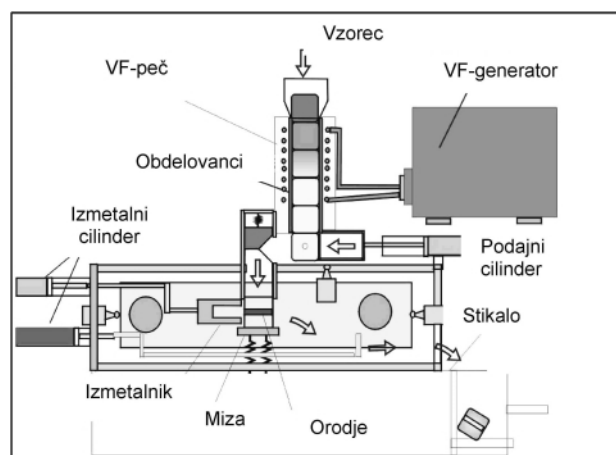
nastala debela bela plast. To plast smo odstranili s profilnim brušenjem.

Toplotna obdelava orodja je potekala v vakuumski peči na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani ² po naslednjem postopku: orodje je bilo segrevano do temperature 1000 $^{\circ}\text{C}$, kjer smo ga zadržali pol ure. Sledilo je hitro ohlajanje na temperaturo 100 $^{\circ}\text{C}$, po ohlajanju pa dvakratno popuščanje na temperaturah 525 $^{\circ}\text{C}$ in 595 $^{\circ}\text{C}$, z vmesnim ohlajanjem na temperaturo 60 $^{\circ}\text{C}$. S takšnim postopkom toplotne obdelave smo dosegli trdoto jekla 48 HRC. Na površini je nastala tudi oksidna plast, ki smo jo pred plazemskim nitriranjem odstranili s profilnim poliranjem.

Plazemsko nitriranje je bilo izvedeno na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani ³. Orodje za testiranje je bilo pred plazemskim nitriranjem segreto do temperature 420 $^{\circ}\text{C}$ v dušikovi atmosferi. Po segrevanju in izenačevanju temperature na 420 $^{\circ}\text{C}$ je potekalo plazemsko nitriranje 24 ur v mešanici dušika in vodika v razmerju 9:1, najprej pri temperaturi 450 $^{\circ}\text{C}$, nato pa pri temperaturi 480 $^{\circ}\text{C}$. Sledilo je počasno ohlajanje na zraku na temperaturo 120 $^{\circ}\text{C}$. Ob orodju smo plazemsko nitrirali še testne ploščice, ki so imele pred nanosom hrapavost 0,007 μm . Pri teh pogojih plazemskega nitriranja je poleg difuzijske plasti nastala na površini orodij in na testnih ploščicah še tanka spojinska plast. To razpokano spojinsko plast smo s ponovnim profilnim poliranjem odstranili pred nanosom večplastne prevleke.

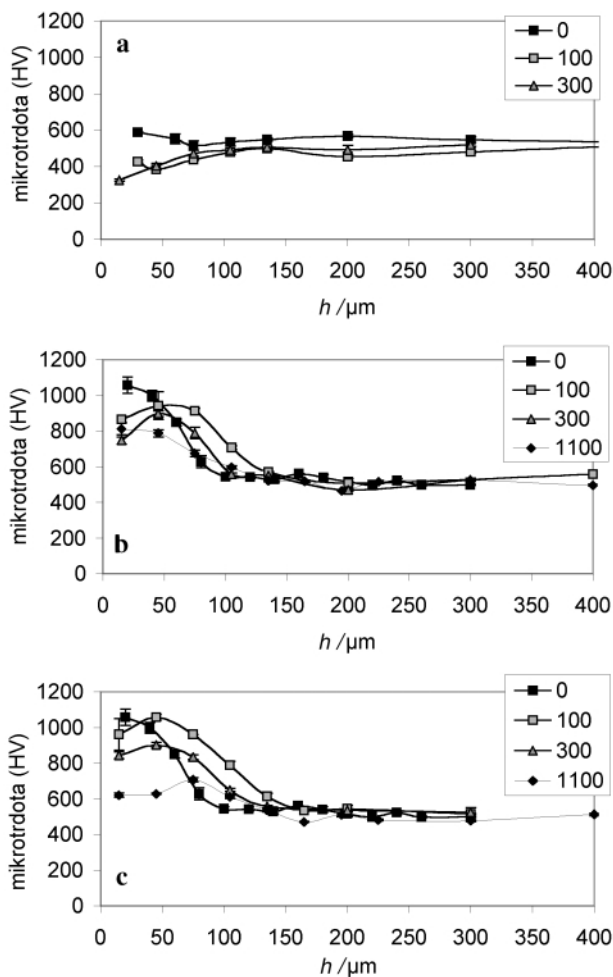
Večplastna PVD-prevleka TiN/TiAlN je bila nanesena v Balzersovem centru v Kapfenbergu (Avstrija) v napravi BAI 1200. Prevleka je bila sestavljena iz 11 plasti TiN in 11 plasti TiAlN, pri čemer je bila zgornja, debelejša plast TiAlN. Mikrotrdota takšne prevleke pri 25 g obtežitve diamantne konice je bila okoli 2700 HV (**slika 2**).

Testiranje orodij pri pogojih toplega preoblikovanja je potekalo na eksperimentalni napravi Gleeble 1500 na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani, na



Slika 3: Shematični prikaz eksperimentalne naprave za toplo preoblikovanje Gleeble 1500

Figure 3: Scheme of the Gleeble 1500 experimental apparatus for warm forming



Slika 4: Mikrotrdota v odvisnosti od globine na sredini zaokrožitve orodij pred preoblikovanjem in po 100, 300 in 1100 udarcih: a) toplotno obdelano, b) plazemsko nitrirano, c) zaščiteno z dupleks postopkom

Figure 4: Microhardness depth profile at the middle of the tool roundings before forming and after 100, 300 and 1100 strokes: a) heat treated, b) plasma nitrided, c) duplex treated

Oddelku za materiale in metalurgijo¹³. Shematični prikaz naprave je na **sliki 3**.

Orodja smo preizkusili pri naslednjih pogojih:

- sila kovanja: 45 kN
- kontaktni čas: 0,65 s
- temperatura preoblikovanja pri kovanju: 1150 °C

Orodje je bilo notranje hlajeno in med preoblikovanjem ni bilo uporabljenega mazanja. Preoblikovanci so bili v obliki ploščic z dimenzijami 2,9 cm × 3,8 cm × 0,53 cm iz konstrukcijskega jekla St 52-3. Po preoblikovanju je bila debelina preoblikovanca 0,24 cm. Čas, potreben za en cikel, je bil okoli 5 s.

Pred testiranjem smo naredili preiskave površine orodij z optičnim mikroskopom, meritve globinskega profila mikrotrdote po metodi Vickers (merilnik Mitutoyo MVK-H2), meritve hrapavosti orodij s profilmetrom (Taylor-Hobson Talysurf Series 2) in meritve konture orodij na avtomatskem 3D koordinatnem

merilnem stroju (DEA Iota Diamond Model 01.02) na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Po testiranju smo orodja preiskali z vrstičnim elektronskim mikroskopom JEOL JXA 840A. Meritve smo naredili po naslednjem zaporedju:

- preiskave z optičnim mikroskopom smo naredili pred preoblikovanjem ter po 300 in 1100 udarcih
- preiskave z vrstičnim elektronskim mikroskopom smo naredili po 300 in 1100 udarcih
- globinski profil mikrotrdote pri obtežitvi 50 g smo naredili pred preoblikovanjem in po 100, 300 in 1100 udarcih
- hrapavost delovne površine orodij smo izmerili pred preoblikovanjem in po 50, 100, 200, 300 in 1100 udarcih
- meritve konture orodij po 50, 100, 200 in 300 udarcih.

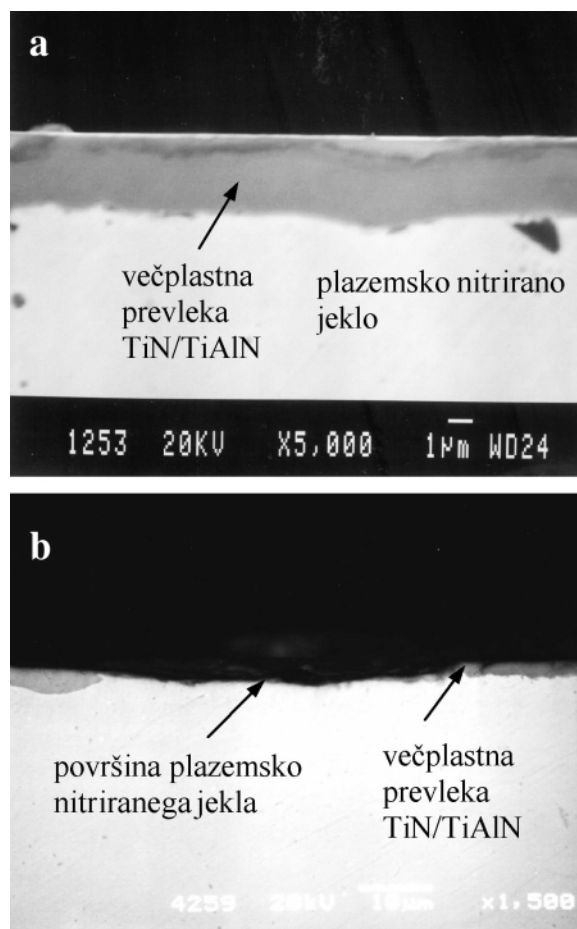
3 REZULTATI

Med preoblikovanjem je prišlo do popuščanja površinske plasti orodja, kar smo zasledovali tako, da smo po določenem številu udarcev izmerili globinske profile mikrotrdote na prerezu na različnih mestih orodja, in sicer:

- na sredini čelne ploskve orodja, kjer so drsne dolžine najmanjše
- na sredini zaokrožitve, kjer so drsne dolžine največje (**slika 4**)
- na koncu zaokrožitve orodja.

Padec mikrotrdote je bil pri vseh treh orodjih največji na začetku in na sredini zaokrožitve, kjer so drsne dolžine največje. Mikrotrdota toplotno obdelanega orodja je padla po 300 udarcih največ na sredini zaokrožitve, in sicer na 320 HV. S tem orodjem smo zaradi nizke trdote prenehali delati. Meritve mikrotrdote na tem orodju so pokazale, da je temperatura orodja do globine 100 μm pod površino presegala temperaturo popuščanja orodij iz jekla Utop Mo1 ($T_{\text{pop}} = 595$ °C). Terčelj in sodelavci¹⁴ so merili temperaturo z vstavljenim termoelementom 150 μm pod površino podobnega orodja. Z metodo končnih diferenc so nato izračunali površinsko temperaturo in temperaturo v posameznih globinah v odvisnosti od kontaktnega časa. Na osnovi njihovih meritev smo za naše pogoje preoblikovanja (kontaktni čas 0,65 s, temperatura preoblikovanja 1150 °C) ocenili, da je bila temperatura na površini orodja 690 °C. Pri plazemsko nitriranem orodju in orodju, zaščitenu z dupleks postopkom, pa smo še opazili, da se je difuzijska cona že po 100 udarcih razširila na 130 μm na zaokrožitvah in na 100 μm na sredini orodja.

Z optičnim mikroskopom in vrstičnim elektronskim mikroskopom smo analizirali površino vseh treh orodij po 300 udarcih. Površino plazemsko nitriranega orodja ter površino orodja, zaščitene z dupleks postopkom, smo analizirali tudi po 1100 udarcih. Površina toplotno

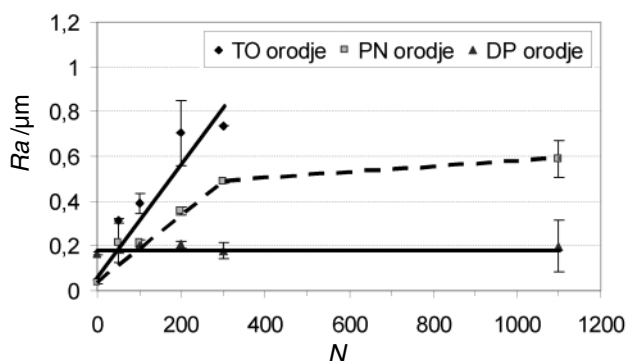


Slika 5: SEM-posnetki zaokrožitvev orodja, zaščitenege z dupleks postopkom po 300 (a) in 1100 (b) udarcih

Figure 5: Cross-sectional SEM micrographs of duplex-treated tool on the roundings after 300 (a) and 1100 (b) strokes

obdelanega orodja in površina plazemsko nitriranega orodja je oksidirala najbolj na zaokrožitvah. Na površini zaokrožitvev plazemsko nitriranega orodja so se po 300 udarcih pojavili majhni nalepki predvsem na koncu zaokrožitvev in $\approx 20 \mu\text{m}$ veliki odkruški ter raze. Orodje, zaščiteno z dupleks postopkom, po 300 udarcih ni bilo poškodovano, opazili smo samo dva mikroskopsko velika nalepka preoblikovanega materiala (slika 5a). Po 1100 udarcih pa se je na površinah plazemsko nitriranega orodja pojavilo veliko nalepljenega materiala predvsem na zaokrožitvah in razpoke v smeri drsenja preoblikovanega materiala. Na orodju, zaščiteno z večplastno prevleko, je bila čelna površina brez poškodb. Na zaokrožitvah smo po 1100 udarcih opazili $50 \mu\text{m}$ veliki poškodbni večplastne prevleke (slika 5b) in eden velik nalepek preoblikovanega materiala (dolg 2 mm in širok 0,5 mm) in pet manjših (velikih manj kot 0,2 mm).

Pred kovanjem smo izmerili največjo hrapavost (slika 6) na orodju, zaščiteno z dupleks postopkom (DP). To je posledica postopka nanašanja večplastne prevleke z metodo katodnega loka. Za ta postopek je



Slika 6: Hrapavost čelne površine orodij R_a pred 50, 100, 300 in 1100 udarcih in po njih (N)

Figure 6: The roughness of the frontal surface of tools before and after 50, 100, 300 and 1100 strokes

značilno, da se material upari delno v obliki mikrokapljič, ki povečajo hrapavost prevleke. Hrapavost tega orodja se praktično ni spremenila do 1100 udarcev. Hrapavost toplotno obdelanega orodja (TO) in plazemsko nitriranega orodja (PN) pa se je povečevala s številom udarcev in sicer precej hitreje na toplotno obdelanem orodju. Meritve konture orodij pa so pokazale, da se kontura orodij po 300 udarcih ni spremenila.

4 SKLEPI

Raziskava obrabe vseh treh vrst orodij je pokazala naslednje:

- mikrotredota vseh treh orodij se je do globine približno $100 \mu\text{m}$ zmanjšala. Pri plazemsko nitriranem orodju in orodju, zaščiteno z dupleks postopkom, se je difuzijska cona na začetku in na sredini zaokrožitve orodja razširila z $90 \mu\text{m}$ na $130 \mu\text{m}$ po 1100 udarcih.
- hrapavost orodja, zaščitenege z dupleks postopkom, se po 1100 udarcih ni spremenila, medtem ko se je hrapavost ostalih dveh precej povečala, najbolj pri toplotno obdelanem orodju
- analiza poškodb na površini orodij z optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom je pokazala, da je toplotno obdelano orodje po 300 udarcih utrpelo največje poškodbe in ni bilo primerno za nadaljnje delo
- po 1100 udarcih smo tudi na plazemsko nitriranem orodju opazili večje poškodbe, medtem ko je bilo orodje, zaščiteno z dupleks postopkom, nepoškodovano

Na osnovi the rezultatov lahko ugotovimo, da je orodje, zaščiteno z dupleks postopkom, obrabno najobstojniješe.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujemo Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport za finančno podporo, dr. Vojtehu Leskovšku z IMT za plazemsko nitriranje orodij ter firmi Balzers GmbH iz Kapfenberga (Avstrija) za nanos prevleke Balinit futura. Zahvala gre tudi sodelavcu Jožku Fišerju za pomoč pri delu.

5 LITERATURA

- ¹ B. Navinšek, P. Panjan, F. Gorenjak, Surf. Coat. Technol. 137 (2001), 225-264
- ² V. Leskovšek, Vakuumist, 14 (1987) 1-5
- ³ V. Leskovšek, Vakuumist, 15/2 (1995) 4-10
- ⁴ J. Souchard, P. Jacquot, M. Buvron, Materials Science and Engineering, AI 40 (1991) 454-460
- ⁵ K. Venkatesan, E. Summerville, C. Subramanian, Materials Australia, (1998) 10-12
- ⁶ J. K. Dennis, E. A. A. G. Mahmoud, Tribology international, 20 (1987) 1, 10-17
- ⁷ F. A. Still, J. K. Dennis, Electroplating and Metal Finishing, (1974) 9-23
- ⁸ J. Kohopaa, H. Hakonen, S. Kivivuori, Wear, 130 (1989) 103-112
- ⁹ J. Smolik, J. Walkowicz, J. Tacikowski, Surf. Coat. Technol., 125 (2000) 134-140
- ¹⁰ B. Navinšek, P. Panjan, I. Urankar, P. Cvahte, F. Gorenjak, Surf. Coat. Technol., 142-144 (2001) 1148-1154
- ¹¹ P. Panjan, I. Urankar, B. Navinšek, M. Terčelj, R. Turk, M. Čekada, V. Leskovšek, Surf. Coat. Technol., 151-152 (2002) 505-509
- ¹² I. Urankar, P. Panjan, M. Terčelj, B. Navinšek, M. Čekada, V. Leskovšek, R. Turk, 9. konferenca o materialih in tehnologijah, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, (2001) 118
- ¹³ V. Nardin, M. Terčelj, R. Turk, T. Rodič, Kovine, zlitine, tehnologije, 31 (1997) 5, 397-402
- ¹⁴ M. Terčelj, R. Turk, M. Knap, Applied Thermal Engineering, 23 (2002) 1, 113-125