

POMEN TRDIH ZAŠČITNIH PREVLEK ZA ZAŠČITO ORODIJ V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI (1. DEL)

Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V zadnjih nekaj letih so bile razvite nove vrste jeklene pločevine, ki imajo veliko natezno trdnost (npr. dualphase steel, TRIP-steel, complex phase steel ali martensite steel). Uporaba takšne pločevine v avtomobilski industriji prinaša vrsto prednosti, saj dosežemo enako trdnost izdelka pri precej manjši debelini pločevine. To pa pomeni ne samo manjšo porabo materiala, ampak tudi precejšnje zmanjšanje mase izdelka v primerjavi s tistim, ki ga naredimo iz konvencionalne pločevine. Seveda pa so za preoblikovanje takšne pločevine potrebni veliko večji tlaki, ki predstavljajo večjo obremenitev za orodje. Za zaščito orodij potrebujemo zato čim bolj trde in žilave trde prevleke. Pri preoblikovanju pa je zelo ugodno, da je koeficient trenja čim manjši.

PVD coatings for protection of tools for steel sheet drawing and forming (Part I)

ABSTRACT

The new high-strength steels sheets (e.g. dualphase steel, TRIP-steel, complex phase steel or martensite steel) have been developed in recent years. The use of such sheet has many advantages in automobile industry, while equal strength of sheet could be obtained at lower sheet thickness. This results in a lower amount of material needed as well as lower weight of parts. However, we need considerably higher press for forming of such steel sheets in comparison with conventional ones resulting in a higher wear of the tools. Therefore new wear-resistant coatings with high hardness, and toughness are necessary. Low friction is beneficial in most forming operations. This paper reviews the recent development in the field of protection of forming tools.

1 UVOD

Tehnologija hladnega preoblikovanja jekel, barvnih kovin in zlitin se je v zadnjih tridesetih letih zaradi velike gospodarnosti serijske proizvodnje izredno razvila. Hladno preoblikujemo predvsem tanjše materiale (pločevino in profile) in manjše surovce do končne oblike in brez predhodnega segrevanja obdelovanca. Da bi snovi lahko preoblikovali, morajo biti v plastičnem stanju, kar dosežemo tako, da jim vsilimo tolikšne razlike glavnih napetosti, da dosežejo napetost tečenja. Sile in obremenitve orodja so zato izjemno velike. Tako narejeni izdelki imajo boljše mehanske in termične lastnosti od tistih, ki jih pripravimo z rezalnimi postopki obdelave (z odvzemanjem materiala).

V materialu nastaja pri preoblikovanju v smeri glavne deformacije vlaknasta mikrostruktura, kar zagotavlja boljše mehanske lastnosti. Čeprav so sile za preoblikovanje velike, pa sta poraba materiala in energije ter stroški proizvodnje v splošnem veliko manjši kot pri litju, vročem kovanju ali pri obdelavi z

rezalnimi postopki (tabela 1). Pri hladnem preoblikovanju se energija porablja le za premeščanje materiala, za spremembo oblike ob nespremenjenem volumnu izdelka in za toplotne obdelave oz. segrevanje. Prav načelo racionalnega in gospodarnega izkoriščanja surovin, izhodiščnih materialov in energije ter zahteva po vedno večji produktivnosti so razlogi, da postaja hladno preoblikovanje vse pomembnejše.

Tabela 1: Prihranki materiala in energije pri različnih postopkih obdelave

Postopek	Izraba materiala (%)	Poraba energije (kJ/kg)
Hladno preoblikovanje	85	48
Toplo preoblikovanje	75	56
Obdelava z odrezovanjem	40 – 50	80 – 100

Postopek hladnega preoblikovanja jekla so prvič uporabili v Nemčiji že pred drugo svetovno vojno, ko je bil s patentiranjem fosfatiranja odpravljen problem hladnega oprijemanja materiala obdelovanca na orodje. Površino obdelovanca je namreč treba predhodno ustrezno pripraviti (nanos nosilnega sloja, npr. cinkovega fosfata), da lahko nanj naneseemo mazalno sredstvo (npr. molibdenov disulfid).

Iztiskujemo lahko kovine, ki imajo v mehko žarjenem stanju trdoto do 19 HRC (230 HV). Stopnja deformacije je odvisna od trdote materiala preoblikovanca. Izdelki, ki jih naredimo na tak način, imajo zelo natančne mere, površina izdelka je zelo gladka in ustreza fino brušeni. Na kvaliteto izdelane površine zelo vpliva obraba orodja in trenje med obdelovancem in orodjem. Orodja za preoblikovanje so izpostavljena ne samo velikim kontaktnim pritiskom (sile preoblikovanja so $>3000 \text{ N/mm}^2$), ampak v nekaterih primerih tudi visokim temperaturam zaradi trenja. Tako se npr. pri protismernem iztiskovanju najbolj obremenjeni deli pestiča segrejejo na temperaturo do 400 °C, medtem ko doseže temperatura preoblikovanca na prehodu iz dna v steno tudi do 500 °C in več. Naštete obremenitve in trenje so vzrok za različne mehanizme obrabe orodja: abrazija, adhezijska obraba, delaminacija, mehansko utrujanje in obraba zaradi oksidacije.

Razvoj na področju avtomobilske industrije gre v smeri zmanjševanja mase. Iščejo se novi kovinski in nekovinski materiali. Kljub vsemu še vedno prevladujejo jekla. Razvoj gre v smeri uporabe jekel z vse

Tabela 2: Primerjava dveh postopkov izdelave votlih teles s hladnim preoblikovanjem

	Globoki vlek	Hladno masivno preoblikovanje
Sile	majhne	velike
Obremenitve pestiča	majhne	velike
Tlak v matrici	majhen	velik
Število stopenj	mного	nekaj
Mazivo	olje	nosilec maziva + mazivo
Utrjevanje	manjše	večje
Procesna omejitvev	pretrg pločevine	trdnost orodij
Oblikovna natančnost	slaba	odlična
Ekscentričnost	dobra	slaba
Velikost izdelkov	veliki – majhni	srednje veliki – majhni

večjo natezno trdnostjo. Natezna trdnost jekel je v področju od 280 N/mm² do 800 N/mm². Seveda pa se z naraščanjem natezne trdnosti poslabšuje sposobnost hladnega preoblikovanja. Razvoj novih jekel mora zato stremeti tudi k izboljševanju njihove hladne preoblikovalnosti (npr. nizkoogljična vakuumsko izdelana jekla).

Glavni pogoj za preoblikovanje pločevine je preoblikovalna sposobnost materiala pločevine. Preoblikovalnost je zelo kompleksna lastnost materiala, ki je odvisna ne samo od snovnih lastnosti materiala in njegove plastičnosti, ampak tudi od preoblikovalnih pogojev, na katere vplivajo zlasti trenje in geometrijske lastnosti obdelovancev oz. orodja za preoblikovanje.

Trdnostne in preoblikovalne lastnosti toplo valjanih konstrukcijskih jekel je mogoče izboljšati z optimalnim termomehanskim režimom preoblikovanja. V avtomobilski industriji se tovrstna jekla pogosto uporabljajo, ne le zaradi večje trdnosti oz. možnosti za zmanjšanje mase izdelkov, ampak tudi zato, ker je mogoče pri izdelavi zahtevnejših preoblikovancev prihraniti eno ali več operacij preoblikovanja v toplem.

V zadnjih letih je bilo razvitih veliko mikrolegiranih jekel za globoki vlek in jekel visoke trdnosti. Za mikrolegirana intersticijsko prosta jekla so značilne ugodne lastnosti za hladno preoblikovanje. Takšna jekla pridobivajo s postopki razogljčenja v vakuumu. Z dodatkom mikrolegiranih elementov (npr. Ti, Nb) dosežejo večje srednje vrednosti koeficienta normalne plastične anizotropije kakor navadna jekla za globoki vlek (Č.0148).

Na razvoj jekel visoke trdnosti z mejo plastičnosti do 500 N/mm² je vplivala zlasti avtomobilska industrija. Glede na mehanizem utrjevanja razlikujemo:

mikrolegirana jekla, "bake-hardening"-jekla, jekla, legirana s fosforjem, in feritno-martenzitna jekla.

Pomembno merilo za uporabo takšne pločevine je dobra preoblikovalnost, ki je v splošnem obratno sorazmerna z njeno trdnostjo. Jekla, legirana s fosforjem, imajo dobre vlečne sposobnosti. Feritno-martenzitna jekla pa se že pri majhnih deformacijah močno utrdijo. Pri obeh vrstah jekel se pojavi t. i. "bake-hardening" efekt, zaradi katerega se pri toplotni obdelavi pločevine med vžiganjem laka meja plastičnosti materiala poveča za 20 – 50 N/mm².

V avtomobilski industriji se vse bolj uporablja tudi nerjaveča pločevina, ne samo za izdelavo izpušnega sistema ampak tudi za opaže vrat. Zelo pogosto pa se uporablja površinsko oplemenitena jeklena pločevina (npr. pocinkana, večplastne pločevine kovina-kovina ali kovina-plastika, sendvične plošče). Površinski nanosi bistveno spremenijo tribološke pogoje hladnega preoblikovanja.

V avtomobilski industriji se povečuje delež alternativnih materialov, predvsem aluminija. Pri audiju A8 so maso avtomobila na račun aluminijevih komponent zmanjšali za 40 % (385 kg Al-komponent sestavlja 125 kg pločevinastih delov, 70 kg profilov, 150 kg litih delov in 40 kg drugih oblik). Pri Fordovem modelu AIV so z uporabo aluminija zmanjšali maso celotne karoserije za 320 kg. Pri uporabi aluminija pa se poraja vrsta triboloških in drugih problemov. Medtem ko se s cinkovo prevleko prekrita jeklena pločevina že dolgo časa uporablja, pa je razvoj s cinkom prekrte aluminijeve pločevine še v teku.

Tudi uporaba plastike je v porastu, vendar je njena uporaba iz ekoloških razlogov dvomljiva, saj takšni izdelki nasprotno od jeklenih in aluminijevih niso primerni za ponovno predelavo.

2 MEHANIZMI OBRABE

Slaba obstojnost orodij za hladno preoblikovanje zmanjšuje natečnost izdelave in kvaliteto izdelkov, povečuje njihovo ceno, povečuje porabo materialov za orodja in obdelovance ter onemogoča uvajanje avtomatizacije proizvodnje.

Orodja za hladno preoblikovanje delajo v izjemno neugodnih razmerah. Impulzne mehanske obremenitve, spremenljive termične obremenitve ter trenje na delovnih površinah orodja povzročajo spremembo strukturnih in mehanskih lastnosti orodnega materiala, zlasti v površinski plasti, ki je v stiku z materialom obdelovanca. V tej plasti pride do mehanskega in termičnega utrujanja orodnega materiala, plastične deformacije, oksidacije in mehanske obrabe.

Osnovni vzrok izrabe orodij za hladno preoblikovanje je mehanska obraba, ki povzroči dimenzijske spremembe gravure. Mehanska obraba in koeficient

trenja sta v največji meri odvisna od stanja površine orodja. Pri normalnem mazanju je obraba tem manjša, čim manjše je trenje. To pa je tem večje, čim večja je hrupavost površine orodja. Vendar pa je v nekaterih primerih pretirano poliranje škodljivo, ker se izboljša kontakt med izdelkom in orodjem, kar povzroči intenzivno segrevanje površine. Povišana temperatura pa spodbudi oprijemanje materiala obdelovanca na posamezne dele gravure.

Med postopkom preoblikovanja so aktivni štirje mehanizmi obrabe: abrazija, adhezija, delaminacija in oksidacija. Za hladno preoblikovanje je značilna kombinacija trenja med dvema trdnima snovema in hidrodinamično trenje, ki pa se zaradi velikih kontaktnih pritiskov (več kot 3000 N/mm²) in nezadostne količine maziva pojavi le lokalno. Med orodjem in obdelovancem pa ni samo olje ampak tudi drobni koščki odtrganin orodja in obdelovanca. Z zaščito orodja poskušamo zmanjšati oba vpliva: tako vpliv trenja kot vpliv abrazivnih delcev.

Majhen koeficient trenja je pri večini preoblikovalnih operacij zaželen, saj zmanjša napetosti. Pri preoblikovanju pločevine trenje vpliva na tok materiala, na kvaliteto površine (geometrijo in gladkost površine) in obrabo orodja. Pomen trenja je še večji pri globokem vleku. Trenje pa se dodatno poveča pri preoblikovanju galvansko oz. elektrokemijsko zaščitene pločevine.

3 ZAŠČITA ORODIJ ZA HLADNO PREOBLIKOVANJE

Starejši postopki za zaščito orodij za hladno preoblikovanje so: nitriranje, boriranje, vanadiziranje in nanos trdega kroma. Njihova uporaba je omejena zaradi premajhne abrazijske obstojnosti, nastajanja mikrorazpok ali slabe oprijemljivosti. Trdo kromiranje v splošnem poveča obstojnost orodja za hladno preoblikovanje tudi za faktor 5 in več. Vendar pa ima v nekaterih primerih tudi negativen vpliv na obstojnost orodja (termična stabilnost takšnega orodja se zmanjša, slaba oprijemljivost kromove zaščitne plasti). Pozitiven učinek dosežemo s pravilno pripravo površine orodja (najbolj primerno je elektropoliranje). Pomembne so tudi strukturne lastnosti orodnega materiala (finozrnatost, enakomerna porazdelitev karbidov). Nekatera maziva, ki vsebujejo ogljik, niso primerna za mazanje takšnih orodij, ker postane kromova zaščitna plast krhka in termično neobstoja.

Nitriranje zmanjšuje verjetnost nalepljanja in povečuje odpornost proti mehanski obrabi. Obstojnost orodja se lahko poveča nekajkrat. V primerih, ko med preoblikovanjem prevladujejo poškodbe orodja zaradi termičnih razpok, nitriranje zmanjšuje obstojnost.

Precej boljše rezultate dosežemo, če orodje zaščitimo s CVD-, PACVD- ali PVD-keramičnimi prevlekami (tabela 3) ⁽¹⁻¹¹⁾. Kombinacija trde in krhke keramične prevleke ter žilave podlage (npr. hitrorezno jeklo) je s tribološkega vidika izjemno ugodna. Nanos nekaj mikrometrov debelih keramičnih PVD trdih prevlek na orodja je še danes najuspešnejši način njihove zaščite pred abrazijsko, adhezijsko in kemo-termično obrabo. Trde prevleke morajo biti ne samo zelo trde, ampak tudi oksidacijsko odporne in kemijsko stabilne pri visoki temperaturi. Hkrati morajo biti slab toplotni prevodnik in imeti majhen koeficient trenja. Z vidika uporabe so bistvenega pomena tudi dobra oprijemljivost na podlage, kristalinična mikrostruktura, finozrnatost, tlačne notranje napetosti, odsotnost mikrorazpok in gladka površina. Obstojnost prekritega orodja je zato veliko večja od neprekritega. Prevleke v splošnem zmanjšajo trenje, zato se zmanjša tudi poraba energije. Ker so kemijsko inertne, zmanjšajo lepljenje oz. navarjanje materiala obdelovanca na orodje. Če jih kombiniramo s plastmi trdega maziva (npr. prevleke na osnovi ogljika), so primerne za zaščito orodij za suho obdelavo.

Trde prevleke so se uveljavile pri zaščiti orodij za klasične postopke obdelave (rezalna orodja, orodja za hladno oblikovanje, orodja za brizganje plastike, orodja za stiskanje prahov). Brez trdih zaščitnih prevlek si ne moremo zamisliti visokohitrostne in suhe obdelave. Trde prevleke, ki se odlikujejo z majhnim koeficientom trenja (npr. WC/C, DLC), pa so se uveljavile kot trdo mazivo za zaščito in mazanje strojnih delov (npr. zobniki, ventili in batni obročki za motorje). Zelo široko področje uporabe trdih prevlek je tudi nadomeščanje elektrokemijskih zaščitnih in

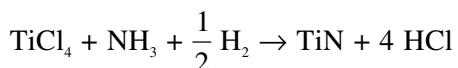
Tabela 3: Primerjava stroškov zaščite orodja za hladno preoblikovanje in povečanje njegove obstojnosti. Preizkus je bil narejen s trnom (premer 50 mm) za protismerno iztiskovanje, ki je bil izdelan iz HSS-jekla 1.7147. Obdelovanec: jeklo 1.3343, uporabljeno mazivo: Bonderlube 236. Vir: Westheide, Univerza v Stuttgartu.

	Strošek obdelave (vključno s toplotno obdelavo)	Povečanje obstojnosti
Brez zaščite	1,0	1,0
Plinsko nitriranje (40 h)	1,02	4,5
Plazemsko nitriranje (~25 µm)	1,06	0,75
Plinsko nitrocementiranje (3 h)	1,08	1,5 – 4,5
Boriranje (20–30 µm)	1,35	ni podatkov
Vanadiziranje (4 h)	1,35 – 1,75	ni podatkov
PVD-prevleka (3–6 µm, TiN)	1,35 – 1,75	32
CVD-prevleka (8 µm, TiC)	2,65	ni podatkov

dekorativnih prevlek (npr. CrN namesto trdega kromanja, ZrN namesto trdega zlatenja).

4 CVD-POSTOPKI

Bistvo tega postopka je kemijska reakcija med izbranimi plini na vroči podlagi (800–1000 °C). Reakcija je lahko termični razkroj (piroliza), substitucija ali dvojna substitucija. Klasičen primer dvojne substitucije je nanašanje TiN-prevlek po shemi:



Tlak v reaktorski posodi je lahko atmosferski, po navadi pa je nekoliko znižan, ker tako izboljšamo kvaliteto in uniformnost prevleke na podlagah z veliko površino.

Poglavitne slabosti pa so visoka temperatura nanašanja, ki omejuje izbiro podlag, in omejena izbira kemijskih reakcij v plinski fazi, ki so primerne za pripravo trdih prevlek. Tudi nekateri stranski produkti reakcij (npr. HCl) in vodik (vodikova krhkost pri jeklih) niso željeni, ker poškodujejo podlage in so ekološko nesprejemljivi. Izhodne snovi so v večini primerov halogenidi prehodnih elementov, ki pa so hlapljive spojine, zelo občutljive za vlago, delo z njimi pa zahteva posebne varnostne ukrepe.

Prednosti CVD-postopkov so tudi enostavna reaktorska posoda in enostavna kontrola postopka.

CVD-prevleke se odlikujejo z odlično oprijemljivostjo na podlago, ki je posledica visoke temperature nanašanja. Notranje natezne napetosti v CVD-prevlekeh so majhne, zato lahko pripravimo relativno debele zaščitne prevleke (do 10 µm). Tako debelo prevleko pripravimo v 3–4 urah. Zaščitna prevleka je enakomerno debela po vsej površini orodja, tudi v globokih luknjah in režah. S CVD-postopkom lahko prekrivamo zelo velika orodja, ki jih med nanašanjem ni treba vrteti.

Zaradi visoke temperature nanašanja lahko pride do znatnih dimenzijskih sprememb in deformacij. Hkrati pride tudi do razogljichenja vrhnje plasti orodja, kar povzroči globoke poškodbe (do 1 mm) na površini orodja, potem ko se prevleka izrabi. Ogljik iz površinske plasti orodja reagira s kovinsko komponento (npr. Ti), pri čemer nastane karbidna faza. Trdota razogljichenje plasti orodja pade, zato se v tej plasti pojavijo razpoke zaradi utrujanja materiala. Orodje se pri visoki temperaturi razkali, zato ga moramo po nanosu prevleke toplotno obdelati v vakuumu. Ker pri tem izgubimo dimenzijske tolerance, CVD-postopek ni primeren za zaščito preciznih orodij za hladno preoblikovanje. Slaba stran CVD-postopka je tudi v tem, da je ekološko problematičen.

Vse CVD-prevleke, ki se uporabljajo za zaščito orodij, so narejene na osnovi titanovih spojin (TiC, TiN, TiCN). Prevleke pripravimo v obliki enojne plasti ali večplastne strukture (do 5 plasti). CVD-postopek je zlasti primeren:

- za zaščito matric za hladno preoblikovanje in matric za globoki vlek, kadar je debelina pločevine večja od 2 mm
- za zaščito orodij, s katerimi preoblikujemo pločevino z natezno trdnostjo nad 450 N/mm² in debelino več kot 0,8 mm
- za zaščito orodij za preoblikovanje nerjaveče pločevine
- kadar ni dovoljena uporaba maziv
- za preoblikovanje galvansko oz. elektrokemijsko obdelane pločevine
- za zaščito orodij pri procesih preoblikovanja, kjer se površina obeh delov orodja (matrica, pestič) segreje.

Večplastna CVD-prevleka TiC/TiCN/TiN debeline 6–9 µm, je zlasti primerna za hladno preoblikovanje materialov, ki so nagnjeni k adhezijskemu hladnemu navarjanju (avstenitna jekla, pocinkana pločevina). TiC-prevleka, ki je trša, se uporablja tudi za preoblikovanje bolj abrazivnih materialov, npr. pri globokem vleku debele pločevine in za zaščito orodij za hladno preoblikovanje aluminija.

5 PVD-POSTOPKI

Ker potekajo PVD-postopki pri temperaturi, ki je nižja od temperature popušcanja večine orodnih jekel, se lahko izognemo mnogim težavam, s katerimi se srečujemo pri CVD-postopkih (razogljichenje, izguba dimenzijskih toleranc). Kljub tem prednostim pa imajo PVD-postopki tudi svoje slabosti. Adhezija prevleke na podlago je precej manjša v primerjavi s CVD-prevleko, kar pri zahtevnejših primerih uporabe orodij za hladno preoblikovanje pomeni odstopanje plasti. Za PVD-prevleke so značilne relativno velike tlačne notranje napetosti, zato ne moremo pripraviti prevlek z debelino več kot 5 µm. PVD-postopki so primerni za nanos zaščitnih prevlek na manjša orodja. Debelina prevleke po površini orodja s komplicirano geometrijo ni enakomerna, nanos v globoke luknje in reže pa ni možen. Cena nanosa PVD-prevleke je 2- do 3-krat večja od cene trdega kromanja, toda dvakrat manjša od CVD-prevleke (tabela 3).

PVD-prevleke se uporabljajo za zaščito orodij za preoblikovanje v naslednjih primerih:

- kadar preoblikujemo tanke pločevine z manjšo natezno trdnostjo;
- kadar preoblikujemo galvansko oz. elektrokemijsko zaščitene pločevine;

- v razmerah zmanjšane mazanja;
- kadar se površina matrice med preoblikovanjem segreje.

6 PACVD-POSTOPKI

Kemijski postopki nanašanja prevlek, ki potekajo v plazmi (PACVD) so nekakšna kombinacija CVD- in PVD-postopkov. S plazemsko aktivacijo reakcijskih produktov se temperatura, potrebna za potek kemijske reakcije, zniža pod 500 °C. Razelektrove v reaktorju dosežemo, če tlak plinske mešanice znižamo na nekaj milibarov, vzbudimo pa jo lahko na več načinov: a) z indukcijsko tuljavo, ki jo vzbujamo z visoko frekvenco, b) s kapacitivnim vzbujanjem in c) z mikrovalovnim vzbujanjem. Plazmo zgostimo ali jo usmerimo proti podlagam z magnetnim poljem.

V primerjavi s PVD-postopki omogočajo PACVD-postopki možnost nanosa na večja orodja in na takšna, ki imajo kompleksno geometrijo. Njihova prednost pred CVD-postopki je v nižji temperaturi nanašanja prevleke. Tako se izognemo krhkosti karbidne trdine, ki se pogosto pojavi med CVD-nanosom.

7 SKLEPI

Trde prevleke preprečujejo adhezijsko, abrazijsko in kemotermično obrabo orodja. PVD- in CVD-prevleke zagotavljajo povečanje obstojnosti orodja, zmanjšajo čas vzdrževanja, hkrati pa omogočajo za 70–90 % manjšo porabo maziv.

PVD-postopki so nepogrešljivi pri zaščiti rezalnih orodij, nekaj manj pogosto pa se uporabljajo za zaščito orodij za hladno preoblikovanje. Razlogi so naslednji:

- Takšna orodja imajo pogosto zelo komplicirano geometrijo z velikim številom hladilnih kanalov in kavitacij. Masa takšnega orodja pogosto presega nekaj sto kilogramov, velikost pa nekaj deset centimetrov. Oboje onemogoča vrtenje podlage med nanašanjem PVD-prevleke.
- Komplicirane oblike orodja so najpogosteje narejene s potopno erozijo, ki povzroči nastanek

razkaljene plasti na površini (t. i. bele plasti), ki poslabša oprijemljivost PVD-prevleke.

- Cena takšnih orodij je ekstremno visoka (tudi več kot 100.000 evrov), kar onemogoča optimizacijo zaščitnih prevlek, ker je vsako eksperimentiranje preveliko tveganje za lastnika orodja.

Za zaščito orodij za hladno obdelavo se uspešno uporabljajo tudi CVD-postopki, zlasti kadar preoblikujemo debelo pločevino (nad 2 mm) oz. tako, ki ima natezno trdnost več kot 400 N/mm², vendar moramo orodje zaradi deformacij med nanašanjem CVD-prevleke zelo skrbno pripraviti.

Po izrabi lahko orodja, prekrita s PVD- ali CVD-prevleko, obnovimo. Staro prevleko moramo odstraniti, morebitne poškodbe na matrici pa skrbno zavariti.

8 LITERATURA

- ¹P. Pesch, S. Sattel, S. Woestman, P. Masarczyk, K. Herden, T. Stucky, A. Martens, S. Ulrich, H. Holleck, Performance of hard coated steel tools for sheet drawing, *Surf. Coat. Technol.* **163-164** (2003), 739-746
- ²M. Murakawa, S. Takeuchi, Evaluation of tribological properties of DLC films used in sheet forming of aluminium sheet, *Surf. Coat. Technol.* **163-164** (2003), 561-565
- ³M. Murakawa, N. Koga, T. Kumagai, Deep-drawing of aluminium sheets without lubricant by use of DLC coated dies, *Surf. Coat. Technol.* **76-77** (1995), 553-558
- ⁴K. Taube, Carbon-based coatings for dry sheet-metal working, *Surf. Coat. Technol.* **98** (1998), 976-984
- ⁵C. Mitterer, F. Holler, D. Reitberger, E. Badisch, M. Stoiber, C. Lugmair, R. Nobauer, Th. Muller, R. Kullmer, Industrial applications of PACVD hard coatings, *Surf. Coat. Technol.* **163-164** (2003), 716-722
- ⁶<http://www.sputtek.com/paper1999013230a.htm>
- ⁷J. Vetter, R. Knaup, H. Dwuletzki, E. Schneider, S. Vogler, Hard coatings for lubricant reduction in metal forming, *Surf. Coat. Technol.* **86-87** (1996), 739-747
- ⁸B. Navinšek, P. Panjan, Novel applications of CrN (PVD) coatings deposited at 200 °C, *Surf. Coat. Technol.* **74-75** (1995), 919-926
- ⁹B. Navinšek, Trde zaščitne prevleke, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, 1993
- ¹⁰<http://www.balzers.at/stanzen.php>
- ¹¹L. Carreras, S. Bueno, F. Montala, Advanced coatings for automotive industry forming dies, 7th Inter. Research/Expert Conference TMT 2003, Spain