

Vpliv hitrosti vlečenja na torne razmere pri globokem vleku

FRANC GOLOGRANC – JANEZ PIPAN

1. UVOD

Čeprav lastnosti materiala bistveno vplivajo na uspešnost preoblikovanja tanke pločevine, je problematiko industrijskega izdelovanja tankostenskih preoblikovancev mogoče povsem obvladati le, če upoštevamo tudi druge bistvene dejavnike, med katerimi so pomembni zlasti makro- in mikrogeometrične karakteristike preoblikovanca in orodja, tribološki parametri ter medsebojni učinek sistema stroj – orodje – obdelovanec [1].

Medtem ko so razmere pri globokem vlečenju preprosti rotacijsko-simetrični izdelkov kolikor toliko pregledne in do določene mere tudi teoretično pojasnjene, pri zasnovi preoblikovancev zahtevnejših oblik, izdelavi orodij in določanju optimalnih parametrov preoblikovalnega procesa zanje doslej ni uspelo postaviti zanesljivih matematičnih zakonitosti. Šele z naglim razvojem računalniške obdelave podatkov je tudi tehnika preoblikovanja dobila učinkovit pripomoček za numerično reševanje in simuliranje preoblikovalnih postopkov, ki lahko znatno pospeši in poenostavi načrtovanje, konstruiranje in izdelavo preoblikovancev kakor tudi preoblikovalnih orodij. Pogoji za njegovo uspešno uveljavitev pa je, da so prej določene dejanske snovne in preoblikovalne karakteristike materiala, natančno definirani pa morajo biti tudi robni pogoji preoblikovalnega procesa.

Glede na to, da ima trenje med obdelovancem in orodjem tudi pri vlečenju velik vpliv na potek in velikost plastičnih deformacij in napetosti ter da se tribološki parametri v kontaktnih conah s časom in geometričnimi značilnostmi preoblikovancev spreminjajo, sta optimalna izbira maziva in njena uskladitev s pogoji preoblikovanja za gospodarno izdelavo izredno pomembni. Ker popolnega modela za identifikacijo tornih razmer tribološkega sistema pri vlečenju pločevine še nimamo, skušamo ugotavljati razmere v posameznih tornih območjih s poenostavljenimi modelnimi preizkusi. S sintezo rezultatov le-teh pa je mogoče priti do globljih spoznanj o vlogi in pomenu trenja tudi pri bolj zapletenih preoblikovalnih razmerah.

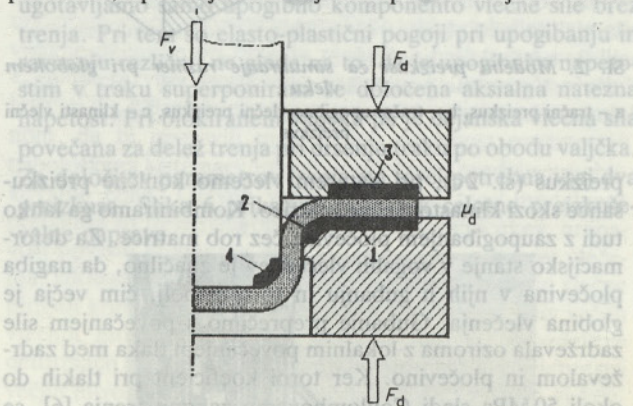
2. SIMULIRANJE TRENJA PRI VLEČENJU

Pri preoblikovanju z vlečenjem je pločevina izpostavljena kompleksnim, nestacionarnim deformacijsko-napetostnim razmeram: dvoosnemu raztezanju, čistemu globokemu vlečenju ter elastičnemu in plastičnemu upogibanju. Deformacijsko stanje in velikost plastičnih deformacij, ki sta v veliki meri odvisna tudi od trenja na stičnih ploskvah, odločata o tem, kdaj, kje in kako bo pločevina odpovedala. Pri tem se pojavlja trenje med površino pločevine in elementi orodja v treh značilnih conah (sl. 1) [2]:

- a) med držalom in matrico,
- b) na vlečnem robu matrice in
- c) na robu pestiča.

Medtem ko naj bi bilo trenje na robu vlečnega pestiča čim večje, mora biti v prvi in drugi coni čim manjše, da bi se zmanjšali natezna napetost v steni vlečenca in obraba matrice. Katero od obeh tornih območij ima večji vpliv na

vlečno silo in s tem na obremenitev vlečenca, je odvisno od geometričnih karakteristik izdelka in preoblikovalnega orodja ter od vlečnega razmerja β_1 . Preoblikovalni postopek lahko torej optimiramo le, če poznamo poleg preoblikovalnih lastnosti pločevine tudi vplive posameznih procesnih parametrov na mejno deformacijo. Ker pa vseh dogajanj v preoblikovalni coni ni mogoče ugotavljati med samim procesom, uporabljamo za njihovo prikazovanje laborato-



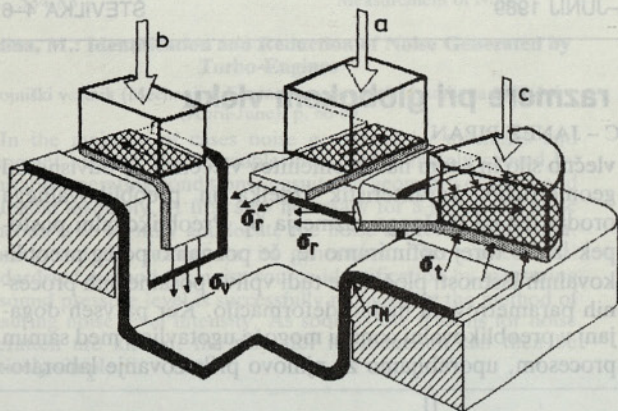
Sl. 1. Značilna torna območja pri globokem vleku

1 – cona trenja med matrico in pločevino (μ_d), 2 – vlečni rob matrice (μ_m), 3 – cona trenja med zadrževalom in pločevino (μ_d), 4 – vlečni rob pestiča (μ_p), F_v – vlečna sila, F_d – sila pločevinskega zadrževala

rijske modelne preizkuse, ki na poenostavljen način upodabljajo lokalne deformacijske in torne razmere pri resničnem preoblikovalnem postopku.

Prva preizkusna metoda za določanje vpliva trenja je vlečni preizkus po Swiftu, ki najbolj zvesto posnema preoblikovalni proces pri globokem vleku [3]. Ker pa so dimenzije preizkušancev pri tem preizkusu razmeroma majhne, geometrična podobnost pri večjih izdelkih ni nujno zagotovljena. Grafometrična analiza deformacij na samih vlečencih [4] je sicer zelo primerna za ugotavljanje dejanskih preoblikovalnih razmer in kvalitativno ocenjevanje vpliva trenja na deformacijsko stanje, ne da pa se z njo neposredno meriti tornih sil in koeficienta trenja. Zato so v preteklosti razvili več modelnih preizkusov za simuliranje trenja pri globokem vlečenju. Najbolj preprost je tračni vlečni preizkus, s katerim pa je mogoče spremljati torne razmere le v območju med zadrževalom in matrico (sl. 2a). Pri tračnem upogibno-vlečnem preizkusu upogibamo pločevino trak prek zaobljenega roba, tako da posnemamo razmere tudi ali samo na robu vlečne matrice (sl. 2b). Pri tem predpostavimo vlečni rob z ravno upogibno črto, ki pa je pri velikih vlečencih največji del obrisa izdelka.

Glede na to, da je pravi proces globokega vlečenja omejen na območja vogalov in krivin z neravno upogibno črto, je torne sile in silo pločevinskega zadrževala mogoče meriti le z ustreznim segmentnim vlečnim orodjem, ki pa je zelo zapleteno, ker sta matrica in zadrževalo sestavljena iz več delov [5]. Za upodabljanje lokalnih razmer pri rotacijsko simetričnih izdelkih ter v vogalih pravokotnih ali nesimetričnih oblik je mogoče uporabiti tudi klinasti vlečni



Sl. 2. Modelni preizkusi za simuliranje razmer pri globokem vleku

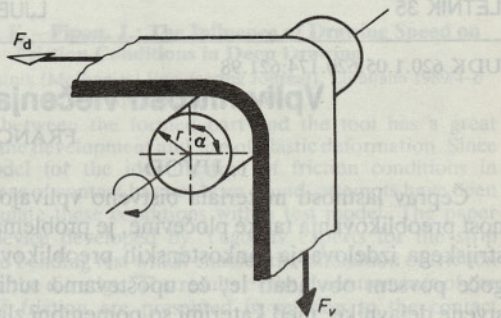
a – trčni preizkus, b – trčni upogibno-vlečni preizkus, c – klinasti vlečni preizkus

preizkus (sl. 2c), pri katerem vlečemo konične preizkušance skozi klinasto vlečno matrico. Kombiniramo ga lahko tudi z zaupogibanjem pločevine čez rob matrice. Za deformacijsko stanje v vogalih vlečencev je značilno, da nagiba pločevina v njih h gubanju in to tem bolj, čim večja je globina vlečenja. Gubanje preprečimo s povečanjem sile zadrževala oziroma z lokalnim povečanjem tlaka med zadrževalom in pločevino. Ker torni koeficient pri tlakih do okoli 50 MPa sledi Coulombovem zakonu trenja [6], se z naraščanjem tlaka zadrževala sorazmerno povečuje tudi sila trenja in s tem obremenitev vlečenca, spreminja pa se tudi hrapavost površine. Nazadnje je pomembna tudi temperatura, ki spreminja lastnosti dotikajočih se površin in maziva, s tem pa vpliva posredno tudi na mejno vlečno razmerje. Zato je torne razmere pri globokem vlečenju dokaj težko natančno simulirati in nobena modelna preizkusna metoda ni univerzalna, tj. enako uspešna in uporabna za vsa območja trenja.

Med najbolj obremenjene dele orodja pri prvem vleku sodi vsekakor vlečni rob matrice, prek katerega drsi pločevina, ko se iz ravnega prireza oblikuje votlo telo z navpičnimi stenami. Z modelnim upogibno-vlečnim preizkusom je mogoče določiti stične tlake na vlečnem robu matrice in koeficiente trenja pri različnih pogojih vlečenja ter nujno odvisnost od vrste obeh materialov, maziv in hrapavosti stičnih površin. Preizkus pa je primeren tudi za testiranje vpliva vrste in kakovosti površinske obdelave preoblikovalnih orodij, njihovih materialov in maziv na lastnosti površine izdelkov. Pri tem simuliramo razmere na vlečnem robu na podlagi modela upogibanja pločevine s superponirano tangencialno vlečno silo, ki povzroča dodatno raztezanje in tanjšanje pločevine (sl. 3). Oprijemni kot traku z vlečnim robom ($\alpha = 90^\circ$) je med preizkusom konstanten in ustreza razmeram v drugi fazi procesa globokega vleka, ko je vlečna globina $h \geq r_m + r_p$.

3. RAZMERE PRI TRAČNEM UPOGIBNO-VLEČNEM PREIZKUSU

Problematika plastičnega upogibanja je v literaturi večkrat obravnavana in za idealno plastične materiale bolj ali manj pojasnjena. Manj raziskane so razmere pri plastičnem upogibanju pločevine s hkratno natezno obremenitvijo



Sl. 3. Model tračnega upogibno-vlečnega preizkusa

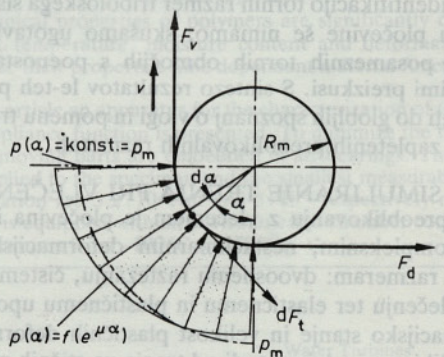
obeh krakov upognjenca, ki je pri prostem upogibanju in upogibanju v matrici običajno ni. Ta dodatna natezna obremenitev traku v smeri vlečenja, s katero simuliramo silo trenja v območju med zadrževalom in matrico, bistveno vpliva na shemo deformacijskega stanja in s tem na torne razmere na vlečnem robu. Podrobneje je plastični upogib s superponirano natezno silo obravnavan v [7, 8].

Vlečna sila F_v , s katero je obremenjen preizkusni trak, povzroča na kontaktni površini upogibnega valjčka stično tlačno napetost $p(\alpha)$, ki je funkcija objemnega kota α in koeficienta trenja $\mu(\alpha)$. Določimo jo lahko iz ravnotežnih pogojev na diferencialnem elementu oboda stične ploskve, iz katerih dobimo normalno silo in vrednost relativne tlačne obremenitve kot funkcijo objemnega kota α

$$F_n(\alpha) = \frac{F_d(\alpha)}{\mu} [e^{\mu\alpha} - 1],$$

$$p(\alpha) = \frac{F_n(\alpha) - F_n(\alpha-1)}{\Delta S},$$

kjer je ΔS – ploščina opazovanega elementa stične ploskve. Porazdelitev dejanske tlačne normalne napetosti na dotikalni ploskvi med idealno upogljivim trakom in valjčkom prikazuje slika 4.



Sl. 4. Porazdelitev stičnega tlaka $p(\alpha)$ na dotikalni ploskvi valjčka

Ker razlika med stičnim tlakom na vstopu in izstopu traku iz upogibne cone ni velika, uporabimo v nadaljnjih izračunih srednjo vrednost p_m . Pri blokiranem valjčku je razlika med vlečno silo F_v in nasprotno silo F_d pnevmatskega valja, s katero simuliramo preoblikovalni odpor, enaka rezultanti upogibnih sil v traku, tj. zvečanju vlečne sile F_v zaradi upogibanja in ponovnega ravnanja. Če valjček blokiramo, pa je tej razliki superponirana še sila trenja F_t .

Sila zadrževanja mora biti pri obeh preizkusih enaka. Z upoštevanjem difference obeh sil dobimo vrednost srednjega tornega koeficienta [7]:

$$\mu_m = \frac{\rho}{r_M} \frac{1}{\alpha} \ln \frac{F_{vb} - F_u}{F_{db} + F_u},$$

kjer pomenijo F_u - zvečanje sile pri upogibanju, F_{vb} - vlečno silo pri blokiranem valjčku, F_{db} - zadrževalno silo pri blokiranem valjčku, ρ - polmer nevtralnega vlakna v traku in r_M - polmer valjčka (vlečne zaokrožitve matrice) in α - objemni kot.

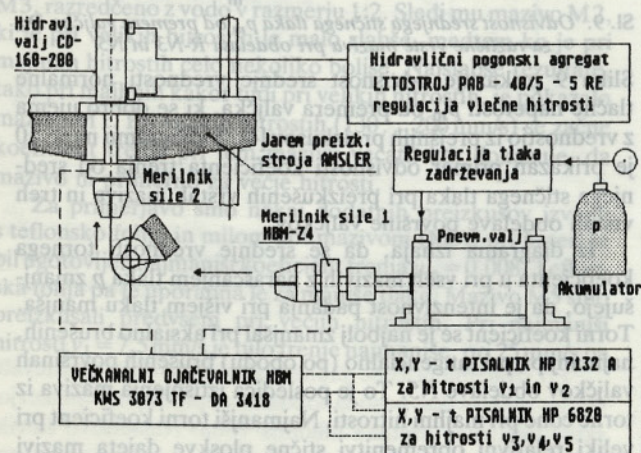
Če zanemarimo dejstvo, da je zaradi različnosti sil F_v in F_d tudi pri vlečenju brez trenja dejanski objemni kot traku $\alpha \approx 90^\circ$ in predpostavimo relativno velik vlečni polmer ($r_M > s$ oziroma $r_M/s \approx 1$), dobi enačba za torni koeficient obliko

$$\mu_m = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_{vb} - F_u}{F_{db} + F_u}.$$

V dveh ločenih preizkusih, ki jih je treba opraviti enkrat z vrtljivim, drugič z blokiranim valjčkom, je treba torej izmeriti vlečni sili F_{vb} in F_{db} , pri tem pa je mogoče z zamenjavo valjčkov in maziva ter spremembo zadrževalne sile F_d in hitrosti vlečenja spreminjati pogoje trenja.

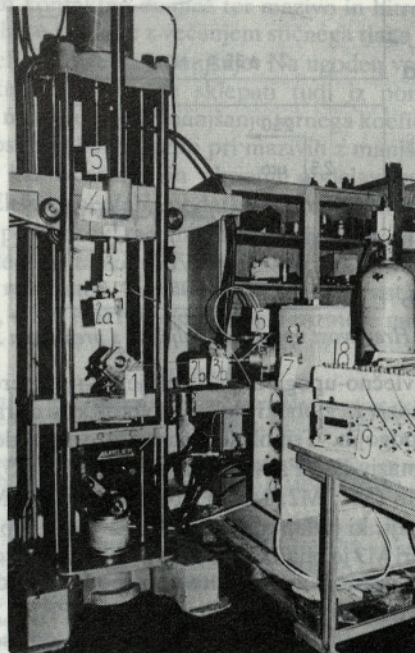
4. NAPRAVA ZA TRAČNI UPOGIBNO-VLEČNI PREIZKUS

Ustrezno modelno preizkuševalno napravo smo razvili skupaj z raziskovalci DO TAM, kjer je bila tudi izdelana [9]. V prvotni izvedbi je bila prirejena za delo na univerzalnem preizkuševalnem stroju, ki je dajal potrebno vlečno silo in pomik traku. Ker pa je območje vlečnih hitrosti pri teh strojih, ki znaša 0...10 mm/s, premajhno za ugotavljanje vpliva hitrosti vlečenja na tribološke parametre v kontaktni coni, smo napravi kasneje prigradili poseben hidravlični pogon za vlečne hitrosti do 200 mm/s in gibom do 200 mm, ki pokriva praktično območje vlečnih hitrosti strojev za globoki vlek [10]. Shema preizkuševalne naprave z merilno verigo je razvidna s slike 5.



Sl. 5. Shema preizkuševalne naprave z merilno verigo

Dolg ozek pas, izrezan iz pločevine pod določenim kotom glede na smer valjanja (0° , 45° , 90°), upognemo prek upogibnega valjčka s polmerom, ki ustreza zaokrožini vlečnega robu. Trak vpneemo na obeh koncih v vpenjalni čeljusti, ki sta spojeni z dinamometrom vlečne naprave. Eden izmed merilnikov sile je pritrjen na batnico posebnega hidravličnega valja, ki je montiran na jarmu preizkuševalnega stroja AMSLER, drugi pa na batnico pnevmatskega valja, ki se iz tlačnega akumulatorja napaja s stisnjenim zrakom. S spreminjanjem tlaka v valju je mogoče nastavljati zadrževalno silo F_d v traku, s katero simuliramo radialno vlečno silo pri globokem vlečenju. Valjček, ki je izmenljiv, je lahko prosto vrtljiv, ali pa je blokiran. V prvem primeru ugotavljamo samo upogibno komponento vlečne sile brez trenja. Pri tem so elasto-plastični pogoji pri upogibanju in ravnanju različni, ne glede na to, da je upogibnim napetostim v traku superponirana še določena aksialna natezna napetost. Pri blokiranem valjčku pa je dejanska vlečna sila povečana za delež trenja pri drsenju traku po obodu valjčka. Za določitev parametrov trenja sta torej potrebna vsaj dva preizkusa. Slika 6 prikazuje posnetek celotne preizkuševalne naprave.

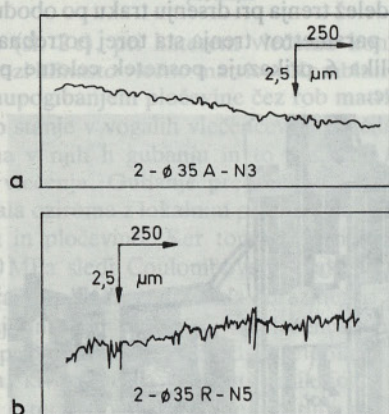


Sl. 6. Posnetek vlečno-upogibne preizkuševalne naprave z merilnimi instrumenti

Hidravlični pogonski agregat LITOSTROJ PAB-40/5 z močjo $P = 5.5 \text{ kW}$ ima regulacijsko batno črpalko, ki omogoča regulacijo pretoka v območju $Q = 10 \dots 40 \text{ l/min}$ ter regulator tlaka, s katerim je mogoče nastaviti želeni, najvišji tlak oziroma potrebno vlečno silo. Delovanje hidravličnega valja krmili poseben ventil, ki omogoča delovni in povratni gib ter mirovanje batnice v začetni legi. Za krmiljenje vlečne hitrosti sta namenjena nepovratni dušilni ventil in regulacijska batna črpalka. Spust in dvig krmilita elektromagnetni stikali, ki sta povezani s procesno kartico. Ta omogoča ročno regulacijo in nastavitve pretoka. Pred začetkom preizkusa napolnimo tlačno posodo s stisnjenim zrakom, čigar tlak ustreza zahtevani sili zadrževanja.

5. PREIZKUSI

Namen raziskave je bil pojasniti zvezo med stičnim tlakom na vlečnem robu in koeficientom trenja ter njuno odvisnost od hitrosti vlečenja, maziva in hrapavosti dotikalnih površin. Te odvisnosti doslej nismo mogli ugotavljati, ker je naprava dovoljevala hitrosti največ do 10 mm/s. Preizkušali smo pri petih vlečnih hitrostih: 7,5, 25, 60, 130 in 200 mm/s. Preoblikovalne značilnosti pločevine Č. 0148 smo določili za vse tri smeri, v katerih so bili izrezani trakovi t. j. 0° , 90° in 45° glede na smer valjanja (SV). Valjčki za vlečno upogibanje trakov s premeri 15, 25 in 35 mm so iz kaljenega orodnega jekla s trdoto 59–61 HRC. Površine valjčkov so bile kaljene in brušene v dveh kakovostnih razredih (N3 in N5) in v dveh smereh: aksialno in po obodu (sl. 7). Ker je bila razlika med obema površinskima obdelavama majhna, velikih odstopkov koeficienta trenja ni bilo pričakovati. Kakovost površine preizkušancev razreda N6 – N7 je bila dokaj enakomerna s hrapavostjo $R_a = 1.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$.



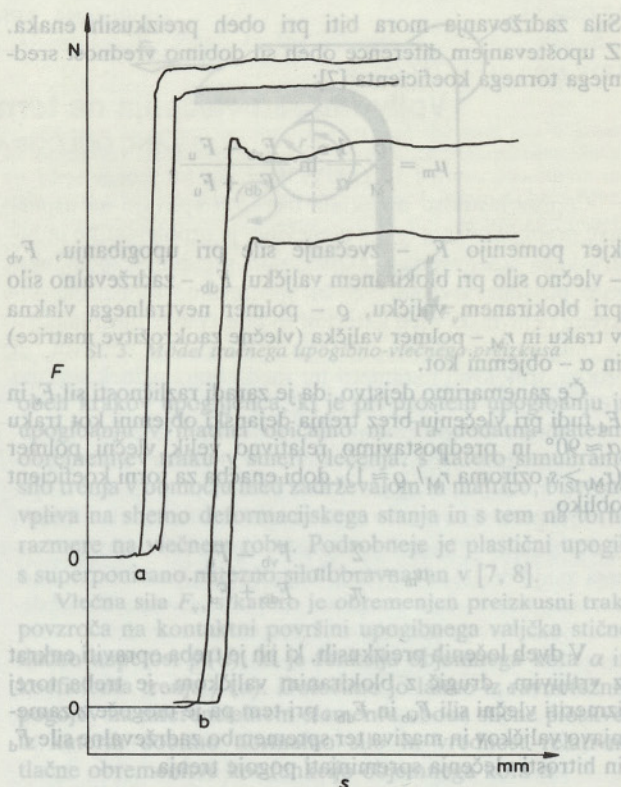
Sl. 7. Hrapavost upogibnih valjčkov s premerom 35 mm

Tračni vlečno-upogibni preizkus je zelo primeren tudi za selekcijo maziv za globoki vlek, če so preizkusi opravljeni pri ustreznih pogojih. Tribološke parametre smo določali za štiri vrste maziv DO FAM – Kruševac: PRES – 514, – 030, – 526 in 418 (M1, M2, M3 in M4). Pri tem sta M3 in M4 emulgirni olji, ki ju lahko razredčimo z vodo. Uporabljena mešanica pri M3 je bila 1: 2, maziva M4 pa nismo redčili, ker daje nerazredčeno boljše rezultate. Po podatkih izdelovalca, je za večje hitrosti najprimernejše mazivo PRES 526.

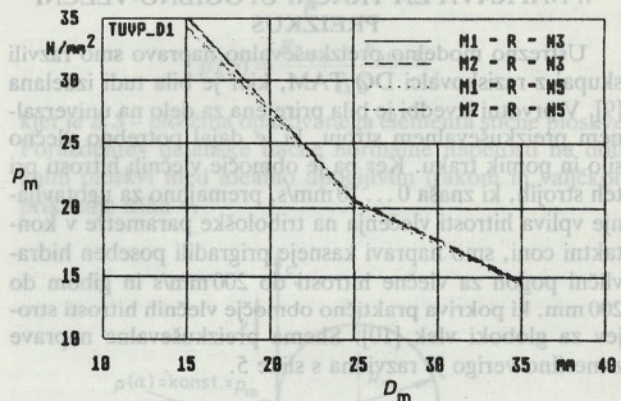
Stični tlak med pločevino in valjčkom je odvisen predvsem od velikosti zadrževalne sile in od krivinskega polmera dotikalne ploskve [4]. Preizkušali smo z zadrževalno natežno napetostjo, ki je bila približno 20 % večja od napetosti tečenja. Vlečno in zadrževalno silo pri vrtljivem, kakor tudi pri blokiranem valjčku, smo zapisovali na pisalniku X–Y za vsak preizkus posebej (sl. 8).

6. REZULTATI PREIZKUSOV IN RAZLAGA

Za primerjavo so bili prirastki natezne sile pri upogibanju in ravnanju traku tudi izračunani [9], pri čemer smo ugotovili, da so iz deformacijskega dela pri upogibanju in ravnanju traku izpeljane vrednosti le malo, iz ravnotežnih momentov zunanjsih sil glede na os valjčka dobljene vrednosti pa veliko večje od eksperimentalnih. Območje srednjih stičnih tlakov na dotikalni ploskvi pri nastavljeni zadrževalni sili in uporabljenih primerih valjčkov je bilo 14...30 N/mm².



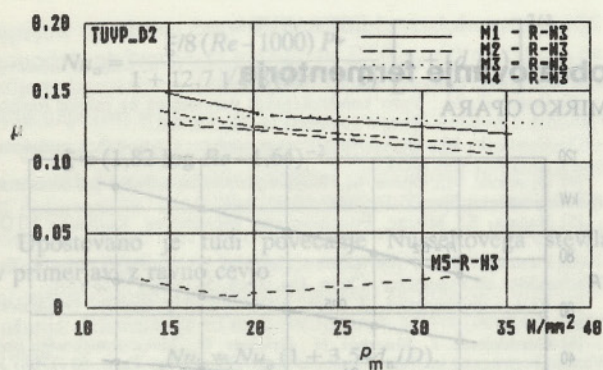
Sl. 8. Zapis poteka vlečne in zadrževalne sile pri vrtljivem in blokiranem valjčku



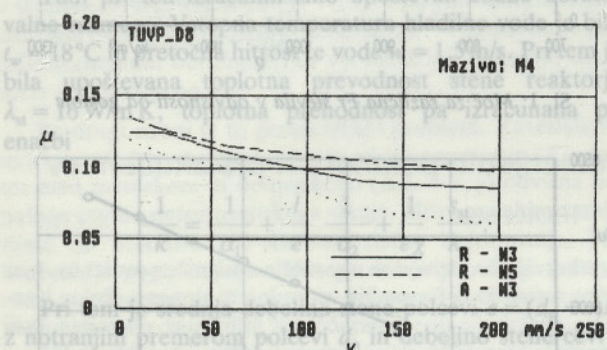
Sl. 9. Odvisnost srednjega stičnega tlaka p_m od premera valjčka D_m za različne vrste maziva pri obdelavi R-N3 in N5

Slika 9 prikazuje odvisnost srednje vrednosti normalne tlačne napetosti p_m od premera valjčka, ki se dobro ujema z vrednostjo iz prejšnjih preizkusov [4]. V diagramu na sl. 10 je prikazan primer odvisnosti koeficienta trenja od srednjega stičnega tlaka pri preizkušenih vrstah maziva in treh vrstah obdelave površine valjčkov.

Iz diagrama izhaja, da se srednje vrednosti tornega koeficienta μ pri vseh mazivih z naraščanjem tlaka p zmanjšujejo, da je intenzivnost padanja pri višjem tlaku manjša. Torni koeficient se je najbolj zmanjšal pri aksialno brušenih, najmanj pa pri tangencialno (po obodu) brušenih površinah valjčkov obdelave N5. To je posledica iztisnjenja maziva iz torne cone pri majhni hitrosti. Najmanjši torni koeficient pri veliki relativni obremenitvi stične ploskve dajeta mazivi PRES 030 in 526, kar se ujema s podatki izdelovalca.



Sl. 10. Odvisnost srednjega tornega koeficienta od srednjega stičnega tlaka p_m za različna maziva pri obdelavi R-N3



sl. 11. Vpliv hitrosti vlečenja v na srednji torni koeficient μ_m pri različnih obdelavah površine valjčkov in mazivu M4

Vpliv vlečne hitrosti na torni koeficient pri mazivu M4 in različnih načinih površinske obdelave valjčkov je prikazan na sliki 11. V skladu s pričakovanji se koeficient trenja z večanjem vlečne hitrosti zmanjšuje, ne glede na hrapavost površine valjčkov. To pojasnjujemo s tem, da se ustvarja pri mazani površini in veliki drsni hitrosti med stičnima površinama mazalni klin, iz katerega se mazivo pri dovolj veliki hitrosti kljub velikemu tlaku ne more iztisniti. V takih okoliščinah je trenje mešano, saj so hitrosti do 200 mm/s, ki smo jih uporabljali pri preizkusih, še vedno premajhne za prehod iz mešanega v hidrodinamično trenje. Za to bi po REISSNER-ju [5] bila potrebna hitrost okoli 500 mm/s. Pri velikih hitrostih 130...200 mm/s se najbolje obnaša mazivo M3, razredčeno z vodo v razmerju 1:2. Sledi mu mazivo M2, ki je pri velikih hitrostih le malo slabše, medtem ko je pri majhnih hitrostih celo nekoliko boljše. Najslabše rezultate, tako pri majhnih kakor tudi pri velikih hitrostih, je pokazalo mazivo M1. Pri velikih hitrostih (130...200 mm/s) se začne koeficient trenja pri tem mazivu večati, kar dokazuje, da mazivo ni primerno za večje hitrosti.

Za primerjavo smo nekaj dodatnih preizkusov izvedli s teflonsko folijo in milom kot mazivom (M5), pri kateri je bil ugotovljen najmanjši koeficient trenja $\mu_m = 0.008$. Teflonska folija pa je uporabna le za manjše tlake. Mazivo M5 smo preizkušali predvsem pri večjih hitrostih. Pri najmanjši hitrosti $v_1 = 7.5$ mm/s je bilo trenje najmanjše, pri 25 mm/s pa

se je teflonska folija začela že trgati, zato se je koeficient trenja povečal na $\mu_m = 0.024$. Pri hitrosti $v_3 = 60$ mm/s se je teflon že povsem raztrgal, tako da je trenje ob koncu prešlo skoraj v suho. Iz tega lahko sklepamo da je teflon v obliki folije primeren le za manjše hitrosti vlečenja.

7. SKLEPI

Napetostno deformacijske in tribološke razmere v območju med pločevinskim zadrževalom in matrico ter na vlečnih robovih matrice in pestiča bistveno vplivajo na preoblikovalne razmere pri globokem vlečenju. Ker dogajanje v preoblikovalni coni ni mogoče opazovati neposredno, skušamo razmere na vlečnem robu simulirati s tračnim upogibno-vlečnim preizkusom. Tako lahko določimo glavne vplivne dejavnike pri drsenju pločevine prek roba matrice. Z doma razvito preizkusno napravo, ki omogoča vlečne hitrosti do 200 mm/s, smo opravili vrsto preizkusov z namenom, da bi ugotovili medsebojno odvisnost parametrov tribološkega sistema v upogibno-vlečnem predelu preoblikovalne cone. Glavne vstopne veličine tega modelnega preizkusa so: relativna obremenitev stičnih ploskev, hrapavost površin kontaktne dvojice ter mazivo in hitrost vlečenja. Izkazalo se je, da se z večanjem stičnega tlaka in vlečne hitrosti koeficient trenja zmanjšuje. Na ugoden vpliv večjih vlečnih hitrosti je mogoče sklepati tudi iz porazdelitve deformacij na vlečencih. Zmanjšanje tornega koeficienta pri večjih hitrostih je bolj opazno pri mazivih z manjšo viskoznostjo ter kakovostnejši in aksialni obdelavi upogibnih valjčkov. Eksperimentalni podatki so pomembni za nadaljnji razvoj postopkov računalniško podprtega simuliranja procesov vlečenja tanke pločevine kakor tudi za verifikacijo teoretičnih rezultatov. Potrebni pa bo še več sistematičnih preizkusov, da bi lahko bolje pojasnili razmere na vlečnem robu.

LITERATURA

- [1] Gologranc, F.: Eksperimentalno teoretična analiza deformacij in opredelitev preoblikovalnosti tanke pločevine. STROJNIŠKI VESTNIK 25 (1979), str. 258-262.
- [2] Gologranc, F. in sodel.: Identifikacija preoblikovalnosti tanke pločevine 6. del. Poročilo za progr. sklop PORS, št. 03-2 131-782 (1983), str. 207-261.
- [3] Gologranc, F. in sodel.: Identifikacija preoblikovalnosti tanke pločevine, Poročilo 7. del za progr. sklop PORS, št. 03-2120-782-84, str. 242-283.
- [4] Gologranc, F. in sodel.: Raziskave hladnega masivnega preoblikovanja in preoblikovanja pločevine. Poročilo za progr. sklop PORS, št. 03-2664-782 (1986), str. 16-47.
- [5] Reissner, J.: Reibungsverhältnisse im Flansch beim Tiefziehen rotations - symmetrischer Teile. Blech-Rohr-Profile, 27 (1980), str. 303-307.
- [6] Gologranc, F. in sodel.: Raziskave preoblikovanja pločevine, 2. del. Poročila za progr. sklop PORS, št. 03-2664-782-87, str. 1-37.
- [7] Swift, H. W.: Plastic Bending under tension. Engineering, (1948), str. 333-335.
- [8] Serepjev, V. V.: Izgib raztjagivaemoj polosj pri namatjivanii jejo na opravku. Kuznečno-štamповаe proizvodstva, 2 (1964), str. 22-24.
- [9] Horvat, Z.-Gologranc, F.-Haring, A.: Vpliv geometrije orodja in delovnih pogojev na preoblikovalnost tanke pločevine. Por. RSS-T, C2-0131-299-84.
- [10] Šiško, M.: Vpliv hitrosti na torne razmere pri modelnih preizkusih. Diplomsko delo, FS, Ljubljana, 1988.

Naslova avtorjev: prof. dr. Franc Gologranc, dipl. inž.,
mag. Janez Pipan, dipl. inž.
oba Fakulteta za strojništvo, Ljubljana