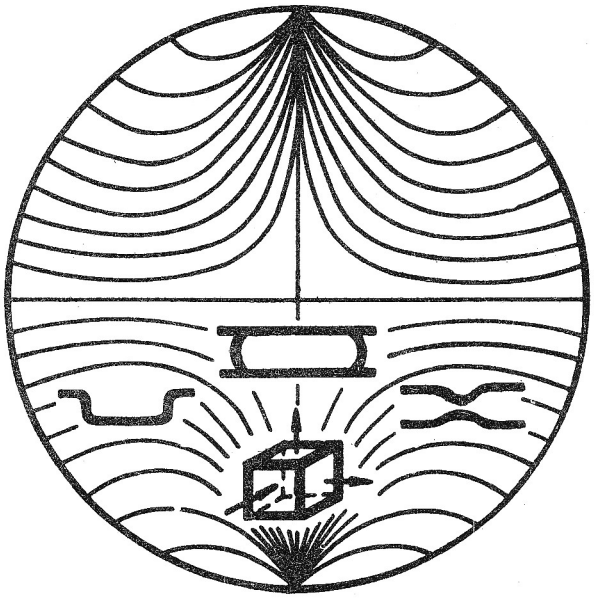
obrada deformisanjem u mašinstvu



br. 7., decembar 1981.

Izdaje: Naučno-obrazovni institut za proizvodno mašinstvo
Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu
21000 Novi Sad
Vladimira Perića-Valtera 2.

Redakcioni odbor:

Prof.Dr Josip Hribar,Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Prof.Dr Predrag Popović, Mašinski fakultet u Nišu

Prof.Dr Binko Musafija, Mašinski fakultet u Sarajevu

Prof.Dr Branislav Devedžić, Mašinski fakultet u Kragujevcu

Prof.Dr Franc Gologranc, Fakultet za strojništvo u Ljubljani

Prof.Dr Stevan Živanović, Mašinski fakultet u Banja Luci

Prof.Vasil Strezov, Elektro-mašinski fakultet u Skoplju

Doc. Mr Dragomir Nikolić, Mašinski fakultet u Beogradu

Dr Peter Leš, Visoka tehnička škola u Mariboru

Prof.Dr Vlado Vujović, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu

Odgovorni urednik: Dr Vlado Vujović
Tehnički urednik: Mr Ilija Trbojević

Korice izradila: Ljiljana Rodić, likovni tehničar

Štampa: OOUR Štamparija za grafičku delatnost
Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu
Veljka Vlahovića 3, telefon 55-622/156

Tiraž: 500 primeraka

Sredstva za štampanje ovog broja časopisa obezbedjena su od strane Samoupravne interesne zajednice za naučni rad Vojvodine, Instituta za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i Mašinskog fakulteta u Nišu.

S A D R Ž A J

Str.

Uz sedmi broj ---------- 1

1. REFERATI, SAOPŠTENJA I PRIKAZI ---------- 3

Dr B.Devedžić
Mr M.Stefanović
Sila i stepen izvlačenja kao parametri uticaja trenja pri dubokom izvlačenju ---------- 4

Dr P.Popović
Prilog rasmatranju problema automatizacije i programskog upravljanja na mašinama za obradu deformisanjem ---------- 19

Dr S.Živanović
Mr M.Jurković
Uporedjenje uticaja materijala obratka i tehnoloških parametara na trajnost alata za deformaciono razdvajanje ---------- 33

Dr P.Leš
Dr A.Alujević
Matematički prikaz računanja po vizioplastični metodi hladno istisnjenog rotacijski simetričnog oblika ---------- 48

Mr H.Djukić
Dr P.Popović
Neki rezultati istraživanja uticaja trenja na kontaktnoj površini izvlakača i obratka na proces dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine zida ---------- 55

Mr D.Vukičević
Dr D. Stefanović
Uticaj dodatka nemetalne faze Al_2O_3 na ponašanje alatnog čelika Fe-Cr12Mo4,8 pri deformisanju i termičkoj obradi ---------- 65

Mr M.Math
Prilog razmatranju teorije sličnosti u procesima plastičnog oblikovanja ---------- 76

Dr V.Vujović
Prilog analizi ponašanja materijala u obradnom sistemu za neke procese sa raznosmernim mehaničkim šemama glavnih napona ---------- 90

Mr M.Plančak
Različite varijante primene metode gornje granice ---------- 101

Mr D.Vilotić
Zavisnost pokazatelja naponskog stanja od stepena deformacije u kritičnoj tački obratka pri slobodnom sabijanju paralelopipeda prizmatičnim alatom ---------- 120

Mr I.Trbojević
Prilog razmatranju problema obradivosti pri obradi materijala vučenjem ---------- 135

Mr E.Šehović
Eksperimentalna identifikacija uticaja kotve na statičku krutost mehaničke prese otvorenog tipa ---------- 146

2. INFORMACIJE ---------- 157

Laboratorija za obradu deformisanjem Instituta za proizvodno mašinstvo, Novi Sad:

Informacija o medjunarodnoj saradnji SAD-Jugoslavija ---------- 158

Katedra za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Nišu:

Informacija o naučnom radu, nastavi, primeni znanja i kapacitetnim karakteristikama ---------- 159

UZ SEDMI BROJ

Na ovom mestu bi se mogao ponoviti tekst iz šestog broja skoro u celini, pošto aktuelnost izložene problematike uz šesti broj nije izmenjana. Izlaženje dva broja godišnje ovog našeg časopisa predstavlja elementarnu nužnost uslovljenu razvojem primene obrade deformisanjem. To do sada još nismo ostvarili. Teškoće su donekle u finansiranju štampanja časopisa, a dobrim delom su rezultat nedovoljnog shvatanja značaja izlaženja ovog časopisa. Laboratorija za obradu deformisanjem Instituta za proizvodno mašinstvo u Novom Sadu je u mogućnosti da i dalje izvršava obaveze u odnosu na organizaciju izlaženja ovog časopisa kao i delimično finansiranje izlaženja časopisa, medjutim, ona nije u mogućnosti da trajno reši pitanje finansiranja izlaženja časopisa. Ovim putem želi da pokrene inicijativu da se nadje rešenje za trajno finansiranje redovnog izlaženja časopisa. Prema cenama štampanja iz druge polovine 1981.god. i za obim časopisa od cca 120 stranica bilo bi neophodno osigurati oko 60 do 80 hiljada dinara po broju. Laboratorija za obradu deformisanjem u Novom Sadu bi se mogla prihvatiti obaveze da iz svojih aktivnosti osigura 20 do 25% potrebnih sredstava za redovno izlaženje časopisa. Ostatak sredstava bi trebalo osigurati iz ostalih jugoslovenskih univerzitetskih centara u kojima je razvijeno područje obrade deformisanjem. Mislimo da se ovde mogu uključiti: Banja Luka, Ljubljana, Kragujevac, Niš, Sarajevo, Skopje i Zagreb. Dobro bi bilo da se mišljenja po ovom problemu dostave na adresu Laboratorije za obradu deformisanjem u Novom Sadu. Dobro došle su i sve druge ideje koje pronalaze neka druga rešenja stabilnog finansiranja izlaženja časopisa za obradu deformisanjem u mašinstvu.

U ovom broju nastojali smo prihvatiti sve radove koji su najavljeni. Zbog očekivanja pristizanja svih najavljenih radova donekle se kasni sa izlaženjem časopisa. Mislimo da je kvalitet i značaj svih objavljenih radova na zavidnom nivou. Ukoliko ima posebnih mišljenja i komentara u vezi objavljenih radova, redakcija moli sve zainteresovane da svoje stavove dostave izdavaču časopisa Laboratoriji za obradu deformisanjem u Novom Sadu.

REDAKCIJA

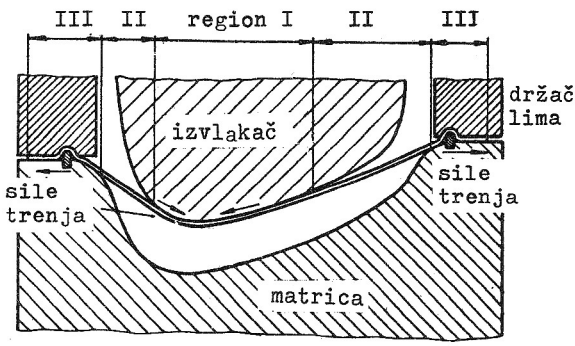
SILA I STEPEN IZVLAČENJA KAO PARAMETRI UTICAJA TRENJA PRI DUBOKOM IZVLAČENJU

Dr Branislav Devedžić, red. profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Kragujevcu

Mr Milentije Stefanović, asistent Mašinskog fakulteta Univerziteta u Kragujevcu

1. Uvod

Spoljašnje trenje, prisutno u skoro svim postupcima prerade metala plastičnim deformisanjem, igra značajnu ulogu pri dubokom izvlačenju limova. Zá razliku od ostalih važnijih činilaca koji utiču na proces izvlačenja (kao što su: geometrija alata, brzina deformisanja i kvalitet materijala), sile trenja, kao aktivne sile, mogu se značajno menjati i doprinositi efikasnosti procesa, ili narušavati njegovu stabilnost. Pri tome postoji jedinstvo pozitivnog i negativnog dejstva sila trenja, što zajedno sa složenom konfiguracijom dela koji se izvlači, znatno komplikuje proces obrade. Uprošćena shema nastajanja sila trenja pri izvlačenju jednog otpreska nepravilne geometrije, data je na sl.1.



Sl.1. Uopšten prikaz zona deformisanja pri dubokom izvlačenju

Karakteristični regioni deformisanja, označeni na slici, zbog razlika s obzirom na uticaj trenja, zahtevaju i posebna razmatranja:

I - zona dvostranog zatezanja lima koji je u kontaktu sa izvlakačem,

II - zona dvostranog zatezanja (ili savijanja sa zatezanjem) lima koji nije u kontaktu sa izvlakačem,

III - zona tangencijalnog sabijanja i radijalnog zatezanja, odnosno klizanja preko oboda matrice (sa ili bez zateznih rebara).

U radu će se detaljno razmatrati model čistog dubokog izvlačenja, koji obuhvata sve pomenute zone, s tim što su zbog relativno jednostavnog oblika (komad je osnosimetričan sa ravnim dnom) neophodna sračunavanja znatno pojednostavljena.

Detaljno izučavanje uticaja spoljašnjeg trenja pri plastičnom deformisanju, odnosno dubokom izvlačenju, pretpostavlja definisanje svih relevantnih elemenata trenja, kao što su:

- veličina kontaktnih - normalnih i smičućih napona,
- fizičko-mehaničke karakteristike kontaktnih površina,
- relativne brzine klizanja,
- temperature u zoni klizanja i dr.

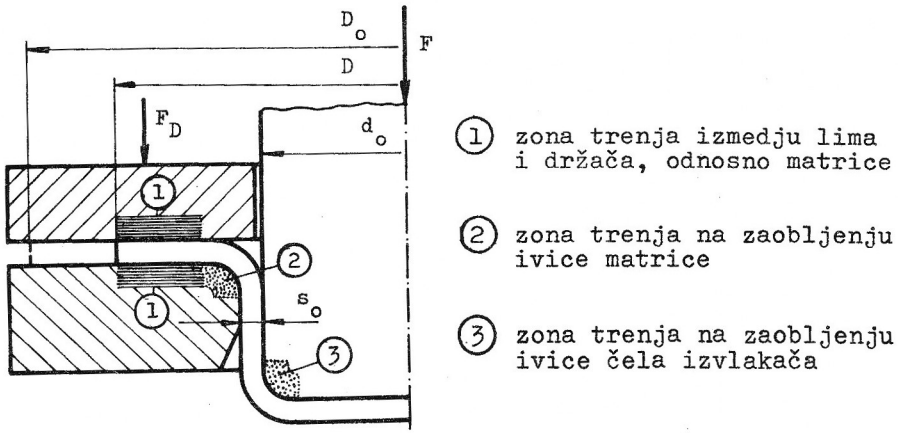
Poslednjih godina se intenzivno izučavaju i drugi aspekti ove problematike: mikro-odnosi i priroda procesa trenja u kontaktu, habanje alata - posebno pri korišćenju novih materijala za limove (čelici visoke čvrstoće), ponašanje prevučenih limova,

izbor maziva i sl.

Centralno pitanje, koje zahteva razmatranje složenog kompleksa nabrojanih činilaca, suštinski je povezano sa istraživanjem mogućnosti za realizaciju aktivnog pozitivnog dejstva sila trenja.

2. Uticaj trenja pri dubokom izvlačenju

Klasičan model čistog dubokog izvlačenja je tzv. Swift-ov postupak, shematski prikazan na sl.2. Komad je osnosimetričan, a pretpostavlja se da debljina lima ostaje stalna. Pri izvlačenju se obod komada intenzivno deformiše, a pojavu nabora onemogućava držač. Na slici su označene i karakteristične zone u kojima se javlja trenje.



Sl.2. Zone trenja pri izvlačenju

Zbog mogućeg izraženog klizanja u zoni zaobljenja čela izvlakača, poželjno je da trenje na tom mestu bude pojačano. Nasuprot tome, u zoni držača i matrice, kao i zaobljenja ivice matrice, potrebno je trenje što više smanjiti, kako bi se smanjio i ukupan otpor na obodu. Zbog toga se podmazivanje normalno vrši samo na obodu, dok se često pribegava korišćenju izvlakača povišene hrapavosti u zoni zaobljenja ivice izvlakača.

2.1. Uticaj trenja na silu izvlačenja

Sila izvlačenja za prvu operaciju, kada je polazni komad okrugla ploča, računa se na uprošćen način /1/, pri čemu se koriste preporuke za izračunavanje radijalnog napona na obodu komada u trenutku postizanja najveće sile /2/.

Sila izvlačenja, koja se registruje pri ispitivanjima, sastoji se iz više komponanata:

a) sile "idealnog izvlačenja" (F_1) koja je neophodna za tangencijalno sabijanje na obodu,

b) sile savijanja i ispravljanja oko zaobljenja ivice matrice (F_2),

c) sile trenja u zoni ravnog oboda komada (F_3),

d) sile trenja na zaobljenju ivice matrice (F_4).

Pri izračunavanju se ne uzima u obzir trenje u zoni 3, prema slici 2.

Ukupna sila se dobija sumiranjem:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \qquad (1)$$

Pojedine komponente se sračunavaju prema sledećim formulama:

$$F_1 = A_o \, \sigma_M \left(\frac{\beta - 1}{2\psi_M}\right)^{\frac{2\psi_M}{1-\psi_M}} \qquad (2)$$

$$F_2 = A_o \frac{\sigma_M \, s_o}{2r_M + s_o} \qquad (3)$$

$$F_3 = 2 F_D \mu \frac{1}{\beta} \qquad (4)$$

$$F_4 = (e^{\mu\frac{\pi}{2}} - 1)(F_1 + F_3) \qquad (5)$$

gde je:

$A_o = d_o s_o \pi [mm^2]$ - površina poprečnog preseka komada prečnika d_o i debljine lima s_o.

σ_M [MPa] - zatezna čvrstoća,

$\beta = Do/d$ - stepen izvlačenja,

ψ_M - deformacija suženja epruvete pri jednoosnom zatezanju u trenutku pojave lokalizovanog deformisanja (koristi se kriva ojačanja II reda, pošto, prema /2/, relativnoj deformaciji pri izvlačenju odgovara deformacija suženja pri zatezanju),

r_M [mm] - poluprečnik zaobljenja ivice matrice,

F_D [N] - sila držanja, koja se može izračunati prema izrazu /7/,

μ - koeficijent trenja, uslovno jednak u svim nabrojanim zonama trenja.

Izraz (1) se može napisati i drugačije:

$$F = F_{ob} + F_{tr} \qquad (6)$$

gde je:

$F_{ob} = F_1 + F_2$ - sila "idealnog" oblikovanja,

$F_{tr} = F_3 + F_4$ - ukupna sila trenja.

Treba napomenuti da se pri dobijanju prednjih izraza smatra da trenje nije funkcija koordinata na obodu, odnosno pri postavljanju diferencijalnih jednačina ravnoteže uticaj trenja se ne uzima u obzir. Detaljno razmatranje problema vezanih za način integrisanja potpunih diferencijalnih jednačina ravnoteže, uzimajući u obzir anizotropiju svojstava materijala i ojačanje, izloženi su u radu /3/.

Umesto složenog integrisanja za slučaj kada se uvodi prostorno naponsko stanje, problem se pojednostavljuje posebnim izračunavanjem sile trenja na obodu komada, uz pretpostavku o skoncentrisanosti sile držača na uskoj prstenastoj površini spoljašnjeg dela oboda /2/.

Sila držanja se računa na uprošćen način:

$$F_D = A_D\, q = \left(D_o^2 - d_o^2 \right) \frac{\pi}{4}\, q \qquad (7)$$

gde je:

q [MPa] - specifični pritisak držanja, koji se prema Siebel-u /1/ računa po formuli:

$$q = 0{,}0025 \left[(\beta - 1)^2 + 0{,}5\, \frac{d_o}{100\, s_o} \right] \sigma_M \qquad (8)$$

Prethodni izraz uzima u obzir, pored stepena izvlačenja i prečnik komada d_o, što izuzetno utiče na vrednost specifičnog

pritiska q , silu držanja F_D i komponentu sile izvlačenja F_3. Optimalna vrednost sile držanja mora zadovoljiti uslove s obzirom na pojavu nabora na obodu, odnosno pojavu razaranja komada. Napominje se da, prema eksperimentalnim istraživanjima /4/ sila držanja koja obezbedjuje očuvanje stabilnosti oboda pri deformisanju nema stalnu vrednost, već da postepeno raste sa porastom hoda izvlakača i da dostiže maksimum pri 1/2 - 1/3 od dubine izvlačenja.

Povećanjem prečnika komada koji se izvlači, povećava se i specifični pritisak na obodu komada, odnosno raste sila držača. Istovremeno se smanjuje granični stepen izvlačenja, što je u skladu sa poznatim preporukama za izbor prečnika po fazama izvlačenja u zavisnosti od relativne debljine s_o/D_o /5/.

Da bi se sagledao značaj uticaja trenja pri izvlačenju komada relativno velikih dimenzija, najjednostavnije je izračunati komponente sile izvlačenja koje se odnose na oblikovanje i trenje, i izvršiti uporedjenje. Pri tome se za svaki prečnik izvlačenja usvaja ili eksperimentalno odredjuje granični stepen izvlačenja /1/.

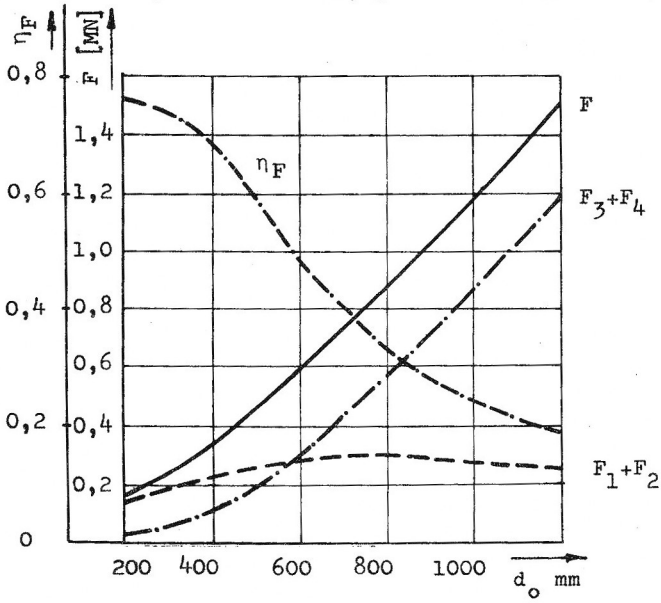
Sračunavanja su vršena prema formulama (2) - (5) za slučaj izvlačenja komada od niskougljeničnog čeličnog lima Č.0148 P5 debljine 0,8 mm, sa zateznom čvrstoćom σ_M = 320 [MPa] i granicom tečenja σ_T = 180 [MPa]. Granični stepeni izvlačenja su usvojeni iz preporuka /4/.

Sa porastom prečnika komada d_o intenzivno raste ukupna komponenta sile trenja F_{tr} u odnosu na silu oblikovanja F_{ob}. Ovo istovremeno znači da kod velikih otpresaka prioritetni uticaj na proces izvlačenja ima trenje u pomenutim zonama. Karakteristike materijala, kao što su zatezna čvrstoća, ojačanje ("n" - faktor), su od sekundarnog značaja; ovo treba uslovno prihvatiti, pošto ovi parametri odredjuju i sposobnost za prenošenje ukupne sile izvlačenja /6/. Optimalnim izborom maziva (i zone njegovog nanošenja) može se znatno smanjiti trenje na obodu i doprineti stabilnosti odvijanja procesa obrade.

Karakterističan je i pokazatelj u smislu ocene navedenog uticaja trenja - tzv. koeficijent efikasnosti procesa izvlačenja /7/, koji predstavlja odnos sile (ili napona) za deformisanje oboda i ukupne sile izvlačenja:

$$\eta_F = F_1/F \qquad (9)$$

Sl.3. ilustruje odnos komponenata sile izvlačenja: sile oblikovanja i sile trenja, kao i koeficijenta η_F u zavisnosti od prečnika komada koji se izvlači, pri koeficijentu trenja $\mu = 0{,}1$.



Sl.3. Komponente sile izvlačenja u zavisnosti od prečnika komada

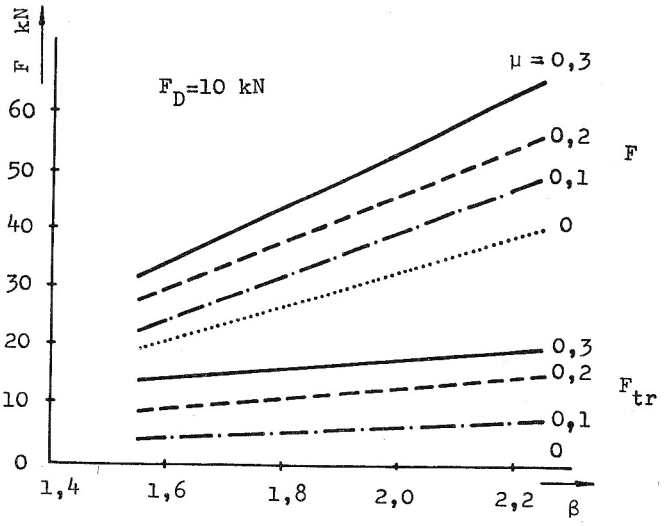
Sila trenja F_{tr} već pri prečniku $D_o = 600$ mm postaje jednaka sili oblikovanja F_{ob}, a zatim naglo raste. Ovaj porast je, svakako, uslovljen porastom specifičnog pritiska držanja sa 1,92 [MPa] pri $d_o = 200$ [mm] na 6 [MPa] pri $d_o = 1200$ [mm]. Ovome odgovara i izražen pad koeficijenta efikasnosti procesa sa 0,76 na 0,19.

Ovakva analiza se može izvršiti za hipotetičke slučajeve različitih stanja na kontaktnim površinama, koja se ovde uprošćeno opisuju preko koeficijenta trenja. Ukoliko se radi o istraživanjima vezanim za modele odredjenih naponsko-deformacionih shema, npr. Erichsen-ov postupak razvlačenja, Swift-ov test dubokog izvlačenja, Enelhardt-ov test i sl., geometrija alata je standardna, pri čemu su karakteristične nominalne mere u odredjenim granicama. Pošto je u drugom delu rada praktično odredjivan stepen izvlačenja u zavisnosti od kontaktnih uslova na obodu, na alatu sa $d_o = 50$ [mm] = const, sprovedena je analiza analogna prethodnoj. Cilj analize je odredjivanje stepena uticaja

trenja kod klasičnog Swift-ovog testa izvlačenja cilindričnog komada sa ravnim dnom.

Na ovaj način se može doći do odgovora na pitanje o celishodnosti ispitivanja maziva uobičajenim postupcima, na alatima manjih dimenzija uz promenljiv stepen izvlačenja β . Bez sumnje, pouzdaniji rezultati bi se mogli dobiti na komadima, kod kojih su i uticajne zone trenja značajno veće.

Korišćenjem prethodnih izraza i navedenih karakteristika materijala, uvrštavajući prečnik izvlačenja d_o = 50 [mm] dobijaju se rezultati prikazani na sl.4. Pri tome je sila držanja jednaka 10 [kN], a koeficijent trenja uzima vrednosti 0,1; 0,2 i 0,3.

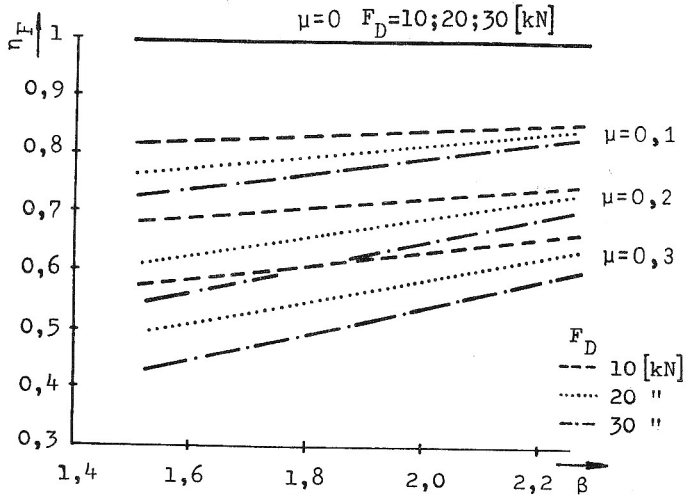


Sl.4. Zavisnost sile izvlačenja i sile trenja od uslova izvlačenja

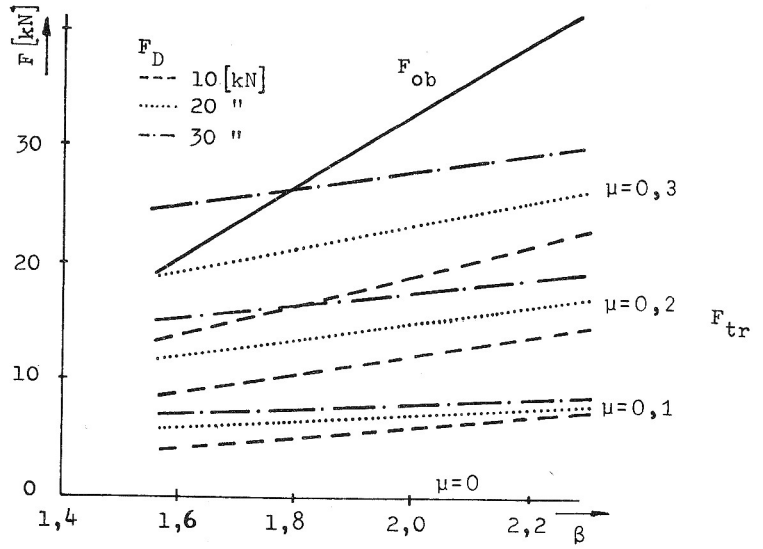
Promena koeficijenta η_F u zavisnosti od sile držača, stepena izvlačenja i koeficijenta trenja data je na sl.5. Zapaža se da sa povećanjem stepena β opadaju razlike izmedju pravih koje se odnose na različite sile držanja i isti koeficijent trenja. Razlog leži u prirodi izraza (4), koji pretpostavlja koncentrisanost sile držanja na spoljašnjoj ivici oboda komada.

Na sl.6. je dat složen prikaz medjuzavisnosti sile oblikovanja, sile trenja i stepena izvlačenja pri različitim koeficijentima trenja (μ) i silama držanja (F_D). Sa porastom stepena izvlačenja smanjuju se razlike izmedju sila trenja pri istom $\bar{\mu}$ i

različitim F_D , ali raste razlika izmedju sila trenja (i sila izvlačenja) pri različitim μ , a pri istoj sili držača F_D.



Sl.5. Zavisnost koeficijenta η_F od stepena izvlačenja pri različitim uslovima izvlačenja



Sl.6. Zavisnost komponenata sile izvlačenja od stepena izvlačenja pri različitim uslovima izvlačenja

Ovo je posebno važno sa gledišta planiranja eksperimenta, npr. pri ispitivanju maziva za duboko izvlačenje, pošto su uočene razlike u silama trenja (odnosno, silama izvlačenja) manje značajne, nego što bi se to moglo očekivati pri porastu β od 1,6 do 2. Ove razlike je moguće i eksperimentalno registrovati, kako će se to u daljem videti.

2.2. Uticaj kontaktnog trenja na granični stepen izvlačenja

Granični stepen izvlačenja je definisan odnosom najvećeg prečnika okrugle ploče i prečnika izvlakača, pri kome je izvlačenje još uvek moguće: $\beta_{max} = D_{omax}/d_o$. Teorijsko sračunavanje graničnog stepena izvlačenja uzima kao osnovu nastajanje nestabilnog deformisanja u kritičnoj zoni komada koji se izvlači (zona neposredno iznad zaobljenja izvlakača). Na osnovu mehaničkih i karakteristika anizotropije, može se izračunati granični stepen izvlačenja izjednačavanjem kritičnog napona u trenutku pojave lokalizovanog deformisanja i ukupnog napona pri izvlačenju /2/, /9/. Sumarni napon se dobija svodjenjem sile po izrazu (1) na nominalni presek komada.

Postoji više različitih pristupa razmatranju ove problematike. Da bi se izbegao dugotrajan klasični eksperiment odredjivanja β_{max}, neki od računskih postupaka su kombinovani delimično sa eksperimentima /8/, dok su neki dosta složeni i baziraju se na teoriji i hipotezama o razaranju materijala /9/. Može se staviti principijelna primedba na sve postupke koji ne uzimaju u obzir kontaktno trenje. Preporuke u literaturi za granične odnose izvlačenja su najčešće date za približno optimalnu silu držanja, pri čemu se o uslovima trenja (vrsta maziva, površine alata i materijala, brzine u kontaktu i sl.) ne daju informacije.

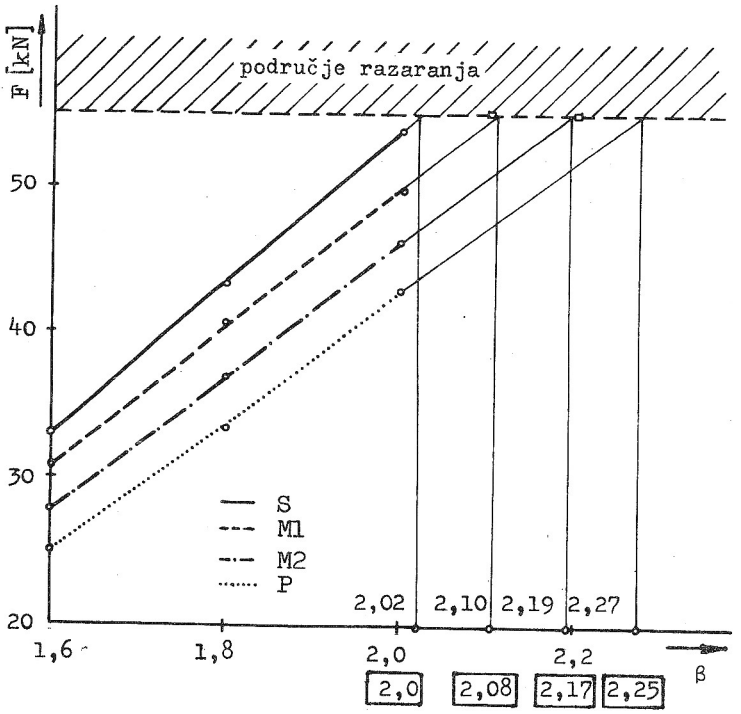
Pri eksperimentalnom ispitivanju vršeno je odredjivanje graničnog stepena izvlačenja na dva načina:

1) brzim grafičkim postupkom - metodom preseka linije razaranja i linije sile izvlačenja,
2) klasičnim postupkom uzastopnih proba uspešnosti izvlačenja.

Prvi postupak se može realizovati na više načina; jedan od njih je principijelno identičan Engelhart-ovom načinu ispitivanja,

pri čemu se menjaju prečnici razvijenog stanja /10/. U radu je ovaj postupak realizovan merenjem sile razaranja pri prečnicima većim od graničnih, a pri stalnoj sili držanja. Granica razaranja se može formirati i pri stepenima izvlačenja manjim od graničnih, ali pri silama držanja znatno uvećanim - kako bi došlo do razaranja.

Na sl.7. predstavljeni su dobijeni rezultati pri ispitivanju graničnog stepena izvlačenja u zavisnosti od kontaktnih uslova na obodu. Izvlačenja su vršena na specijalnoj mašini za ispitivanje limova, tipa ERICHSEN 142/12, pri brzini deformisanja v = 25 mm/min, i stepenima izvlačenja β = 1,6; 1,8 i 2 (pri prečniku izvlakača d_o = 50 mm). Sila držača je stalna i iznosi 15 kN.



Sl.7. Uticaj trenja na obodu komada na granični stepen izvlačenja

Pri ispitivanju su postojala sledeća stanja kontaktnih površina:

- nije korišćeno mazivo (S),

- za podmazivanje su korišćene dve vrste mineralnog ulja (M1) i (M2),
- umesto maziva korišćena je polietilenska folija (P).

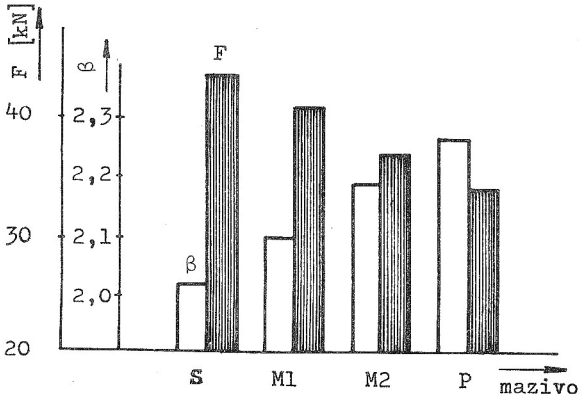
Za svaki stepen izvlačenja i odredjeno mazivo vršena su po tri izvlačenja, pri čemu su tačke ucrtane na linijama veze F - β njihove srednje vrednosti. Srednja kvadratna greška pri merenju sila izvlačenja ne prelazi 20 [daN], što je manje od 1% merenih veličina.

Treba napomenuti da na formiranje granice razaranja ne utiče stepen izvlačenja, kontaktni uslovi i sl., već isključivo mehaničke karakteristike materijala i geometrija alata, koji se u opitu ne menjaju.

Na sl.7. unete su i vrednosti graničnih iznosa stepena izvlačenja dobijenih klasičnim, uzastopnim izvlačenjem (uokvirene brojke), koje se razlikuju od vrednosti dobijenih metodom preseka.

Mada se ne mogu direktno porediti zbog različitih sila držanja, zavisnosti na slikama 4. i 7. su potpuno analogne. Postojeće razlike izmedju sila izvlačenja pri korišćenju različitih maziva za stepene izvlačenja od 1,6 do 2 su registrovane, ali ne govore o suštinskoj prednosti većih stepena β . Istovremeno su potvrdjene pretpostavke o prirodi raspodele sile držača na obodu komada (izraz (4)).

Uobičajeno grafičko predstavljanje rezultata ispitivanja maziva dato je na sl.8., pri čemu su ucrtani podaci samo za silu izvlačenja pri β = 1,8. Kompletan pregled dobijenih odnosa dat je na sl.7.



3. Zaključak

Sa porastom prečnika komada koji se izvlači raste značaj trenja na njegovom obodu. Pri dovoljno velikim prečnicima, sila potrebna za savladavanje otpora trenja je i nekoliko puta veća od sile neophodne za plastično deformisanje oboda. Zbog toga je potrebno kod složenih otpresaka većih dimenzija znatnu pažnju posvetiti definisanju optimalnih uslova trenja na obodu. Ostvarivanje neophodne deformacione sile pri izvlačenju najčešće ne zadaje veće teškoće; dobijeni odnosi pokazuju značaj uticaja trenja pri izvlačenju limova.

Granični stepen izvlačenja, kao jedan od standardnih parametara obradivosti materijala za duboko izvlačenje, u znatnoj meri zavisi od trenja na obodu komada. Vrednosti graničnih stepena izvlačenja, dobijene klasičnim postupkom i"metodom preseka" se razlikuju, ali, što je sa stanovišta ocenjivanja uticaja trenja važno, medjusobni odnosi izmedju tih vrednosti su nepromenjeni.

Standardnim postupkom ocenjivanja maziva pri različitim stepenima izvlačenja, mogu se odrediti i njihovi granični iznosi, što umnogome skraćuje vreme ispitivanja.

Uticaj trenja (ili vrste maziva) u granicama raspoloživog stepena izvlačenja - do β_{max} - je izražen, ali ne toliko kao u slučaju kada se menja i prečnik komada koji se izvlači. Zato se pri ispitivanju maziva uspešno mogu koristiti i niži stepeni izvlačenja - 1,6 ili 1,8.

L i t e r a t u r a

/1/ E.Doege, H.Fetzer, R.Kellenbenz, E.Bergmann, Tiefziehen auf einfach-und doppeltwirkenden Karosseriepressen unter Berucksichtigung des Gelenkantriebs, Werkstatt und Betrieb, 10/1977, 737-804.

/2/ E.A.Popov, Osnovi teorii listavoj štampovki, Moskva, Mašinostrojenie, 1977.

/3/ H.Hermans, Ein Beitrag zur Theorie des Tiefziehens, Blech, 1968, 15, No 12, 648-668.

/4/ N.P.Katkov, V.F.Rešetov, Opredeljenie optimaljnih uslovij prižima flanca zagatovki, Kuznječno-štampovočnoe proizvodstvo, 9/1971, 16-18.

/5/ V.I.Romanovskij, Spravočnik po holodnoj štampovke, Mašinostrojenie, Lenjingrad, 1979.

/6/ E.Doege, K.P.Witthüser, H.G.Joost, Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen, Umform. kolloq., Hannover, 1980, 16/1-16/13.

/7/ S.I.Gubkin, Plastičeskaja deformacija metalov, Metalurgizdat, Moskva, 1960

/8/ B.Kaftanoglu, A Method for Estimating the limiting Drawing Ratio in Deep-drawing, Inter. Jour. Prod.Res. 1974, 12, No 1, 89-98.

/9/ I.J.Havkin, O zavisimosti koeficienta bitjažki ot mehaničeskih svojstv materiala, Kuznj. štampovočnoe proizvodstvo, 10/1973, 25-28.

/10/ D.V.Wilson, B.J.Sunter, D.F.Martin, A Single-blank Test for Drawbility, Sheet Metal Industries, 6/1966, 465-476

DEVEŽIĆ Branislav, STEFANOVIĆ Milentije

SILA I STEPEN IZVLAČENJA KAO PARAMETRI UTICAJA TRENJA PRI DUBOKOM IZVLAČENJU

R e z i m e

U radu se razmatra uticaj trenja na obodu cilindričnog komada koji se izvlači, preko karakterističnih pokazatelja - najveće sile i graničnog stepena izvlačenja. Koristeći uprošćene izraze za izračunavanje komponenata sile izvlačenja, pokazuje se da sa porastom prečnika komada udeo sile koji se odnosi na savladavanje trenja može postati veći od sile potrebne za plastično deformisanje oboda. Kod manjih dimenzija komada, kao što su oni pri laboratorijskim ispitivanjima, ovakvi odnosi su manje izraženi, što znači da je i uticaj stepena izvlačenja manji. Granični stepen izvlačenja značajno zavisi od trenja, i može se uspešno koristiti za ocenu maziva za duboko izvlačenje, kao što je to u radu i eksperimentalno ilustrovano.

THE FORCE AND THE DRAWING RATIO AS THE PARAMETERS OF THE INFLUENCE OF FRICTION IN DEEP DRAWING

S u m m a r y

Considered in the paper are the effects of friction on the flange of a cylindrical workpiece during deep drawing. These effects are expressed by means of characteristic parameters - maximum force and the limiting drawing ratio. Using simplified formulae for calculating the components of the drawing force, it is shown that with increasing workpiece diameter, the fraction of the force needed to overcome the friction may exceed the force required for plastic deformation of the flange. When tne workpiece dimensions are smaller, as is the case in laboratory tests, such relationships are less prominent, hence the weaker influence of the drawing ratio. The limiting drawing ratio depends significantly upon the friction, and may be successfully used for rating the lubricants for deep drawing, which has been demonstrated in the paper by means of experimental results.

PRILOG RASMATRANJU PROBLEMA AUTOMATIZACIJE I PROGRAMSKOG UPRAVLJANJA NA MAŠINAMA ZA OBRADU DEFORMISANJEM [xx]

Dr PREDRAG V. POPOVIĆ, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu.

1. UVOD

Za tehnologiju obrade materijala deformisanjem je karakteristično - izmedju ostalog - sledeće, i to:

- da se - uglavnom - primenjuje u visokoserijskoj i masovnoj proizvodnji i
- da se oblikovanje predmeta obrade ostvaruje iz više uzastopnih - istorodnih ili raznorodnih - tehnoloških operacija.

Ove karakteristike tehnologije obrade materijala deformisanjem ukazuju da se optimalna - najracionalnija i najkvalitetnija - izrada elemenata deformisanjem može ostvariti isključivo u automatizov-

---

[xx] Ovaj rad predstavlja sastavni deo naučno-istraživačkog projekta: "Analiza i razvoj integralnih tehnoloških sistema sa numeričkim upravljanjem za obradu materijala deformisanjem", u čijem finansiranju učestvuju Reginalna zajednica nauke Niša, Elektronska industrija iz Niša i Mašinska industrija iz Niša.

anoj i programski upravljanoj proizvodnji, odnosno sa automatizovanim i programski upravljanim sredstvima za obradu materijala deformisanjem.

Medjutim, činjenica je da primena automatizacije i programskog upravljanja na mašinama za obradu deformisanjem zaostaje - i to kako vremenski, tako i po obimu i kvalitetu - u odnosu na mašine za obradu rezanjem, što nije slučajno, obzirom na:

- specifičnosti koncepcijskih rešenja mašina za obradu deformisanjem;
- uslove njihovog rada i
- obzirom da je obrada materijala deformisanjem - u industrijskom smislu - relativno mlada u odnosu na tehnologiju obrade rezanjem.

Polazeći od poznatih zahteva, koji se postavljaju za obradne sisteme na kojima se primenjuje programsko upravljanje, a to su:

- krutost sistema;
- pouzdanost i tačnost, odnosno nepromenljivost u vremenu kinematičkih zakona i veličina kretanja elemenata mašine i
- neophodna osetljivost prenosnog sistema,

može se konstatovati, da baš ovi osnovni uslovi nisu ispunjeni na mašinama za obradu deformisanjem.

Naime, specifičnosti mašina za obradu deformisanjem se ogledaju u sledećem, i to:

1. Izrazito visokim spoljašnjim opterećenjima najrazličitijeg karaktera, što se odražava na:
   - veličine elastičnih deformacija, kako elemenata mašine, tako i mašine posmatrano u celini;
   - na pojavu inercijalnih sila različitog inteziteta, pravca i smera;
   - na pojavu vibracija i
   - na promenu medjusobnog položaja delova alata u procesu oblikovanja obratka.
2. Značajnim termičkim opterećenjima pri obradi u vrućem stanju, sa oštrim gradijentom promene temperaturskih polja, i to:

- unutar same mašine, odnosno šire sredstava rada i
- u prostoru oko njih.

3. Nepouzdanosti zakona kretanja elemenata mašine, i to:

   - i po karakteru i
   - po intenzitetu,

   što je očigledno na primeru promene hoda pritiskivača u hidrauličkih presa sa promenom intenziteta otpora deformisanju, ili primeru promene zakona promene ugaone brzine rotacije krivaje krivajne prese sa promenom količine deformacionog rada.

4. Otežani uslovi izmene alata u radnom prostoru mašine zbog njihovih domenzija i težina.

5. Raznovrsnosti tehnologija oblikovanja materijala koje se mogu ostvariti u istoj mašini.

2. NEKI PROBLEMI AUTOMATIZACIJE

2.1. Podela sistema

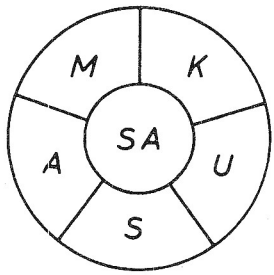
Strukturnom analizom procesa i sredstava rada obrade materijala deformisanjem, mogu se sistemi automatizacije i programskog upravljanja svrstati u sledeće grupe, koje proizlaze iz sličnosti ili istovetnosti zadataka, a to su:

- sistemi za upravljanje tokom materijala;
- sistemi za upravljanje uslovima obrade (temperatura, uslovi hladjenja, podmazivanje, skidanje ogoretine, i dr.);
- sistemi upravljanja režimom rada mašine;
- sistemi za izmenu i regulaciju alata u radnom prostoru mašine i
- sistemi kontrole (materijala, procesa, rada mašine, kvaliteta alata, izradka, itd.).

Na osnovi iznetog, na slici 1., je shematski prikazana klasifikacija sistema mehanizacije i automatizacije (SA), odnosno sistema programskog upravljanja (PU).

Sprovedena klasifikacija omogućuje lakše i sveobuhvatnije parcijalno rasmatranje pojedinih sistema, njihovo optimiranje za date uslove, odnosno unapred definisan i ograničen prostor, kao i l-

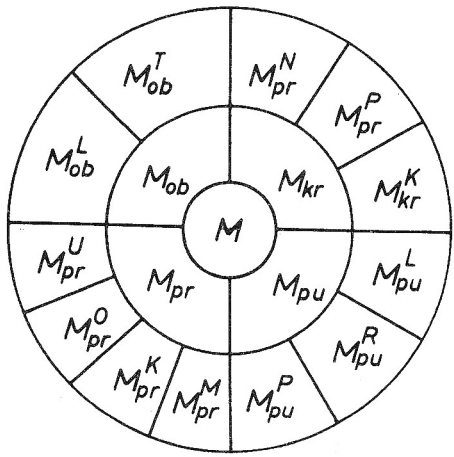
akše koncepcijsko razrešavanje celokupnog sistema automatizacije i programskog upravljanja obradnog sistema za oblikovanje materijala deformisanjem.



Slika 1.

2.1.1. Materijal

Polazeći od oblika materijala, načina njegovog kretanja i oblika putanje, kao i prostora kroz koji prolazi, sistemi za upravljanje i kretanje materijalom se mogu podeliti, kako je prikazano na slici 2., na:



Slika 2.

- sisteme oblika materijala (M_{ob});
- sisteme načina kretanja (M_{kr});
- sisteme oblika putanje po kojoj se kreću (M_{pu}) i

- sisteme prostora kroz koji se kreće materijal (M_{pr}).

Daljom podelom mogu se navedeni sistemi pobliže i preciznije karakterizirati, i to:

2.1.1.1. Sistemi oblika materijala

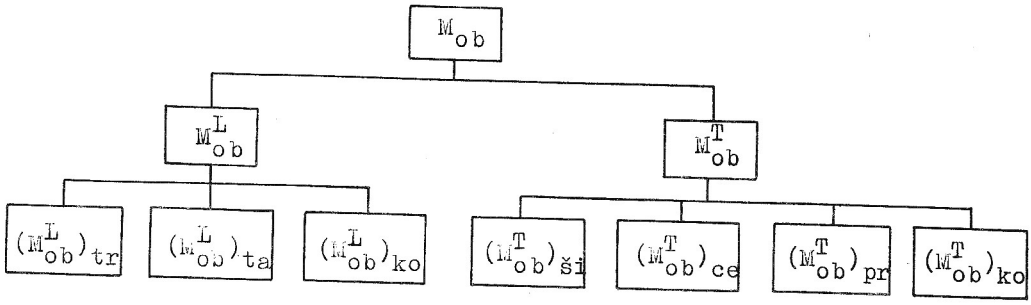
Kako se obrada materijala deformisanjem deli na:

- obradu pri ravanskom naponskom stanju, odnosno obradu limova i
- obradu pri zapreminskom naponskom stanju, odnosno obradu tela,

to se sistemi oblika materijala mogu podeliti u dve vrste, i to:

- sistemi za lim (M^L_{ob}) i
- sistemi za prostorna tela (M^T_{ob}).

Potpunija podela sistema oblika materijala prikazana je na slici 3., gde su:



Slika 3.

- $(M^L_{ob})_{tr}$ - sistemi za trake lima;
- $(M^L_{ob})_{ta}$ - sistemi za table lima;
- $(M^L_{ob})_{ko}$ - sistemi za pripremke od lima;
- $(M^T_{ob})_{ši}$ - sistemi za šipke;
- $(M^T_{ob})_{ce}$ - sistemi za cevi;
- $(M^T_{ob})_{pr}$ - sistemi za profile i
- $(M^T_{ob})_{ko}$ - sistemi za komade.

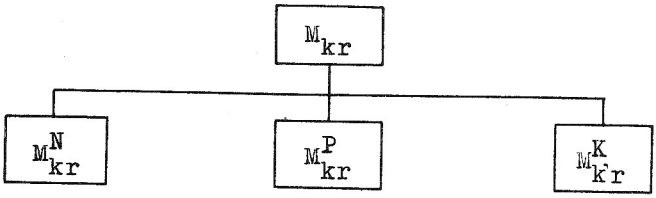
Sasvim je razumljivo da je moguća dalja klasifikacija ovih sistema prema dimenzijama, vrsti materijala i drugim parametrima, što bi pretstavljalo suvišno detaljisanje u ovom radu.

2.1.1.2. Sistemi načina kretanja

Posmatrajući radni prostor (RP) u kome se obavlja preoblikovanje materijala, tada se kretanje materijala do radnog prostora i od radnog prostora može obavljati sledećim načinima, i to:

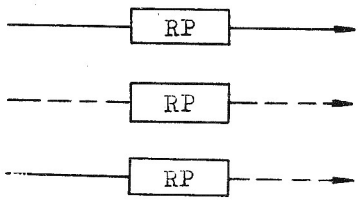
- kontinuirano, odnosno neprekidnim kretanjem (M^{N}_{kr});
- prekidno, odnosno periodično (M^{P}_{kr}) i
- kombinovano (M^{K}_{kr}),

što je shematski prikazano na slici 4.



Slika 4.

Simbolično predstavljena navedena kretanja materijala u odnosu na radni prostor data su na slici 5.



Slika 5.

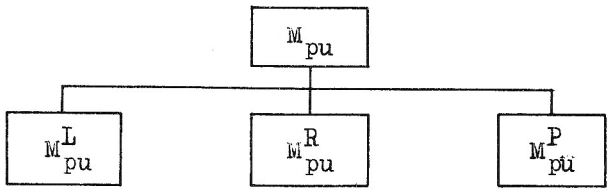
2.1.1.3. Sistemi oblika putanje

Prema obliku putanje materijala sistemi se mogu podeliti na:

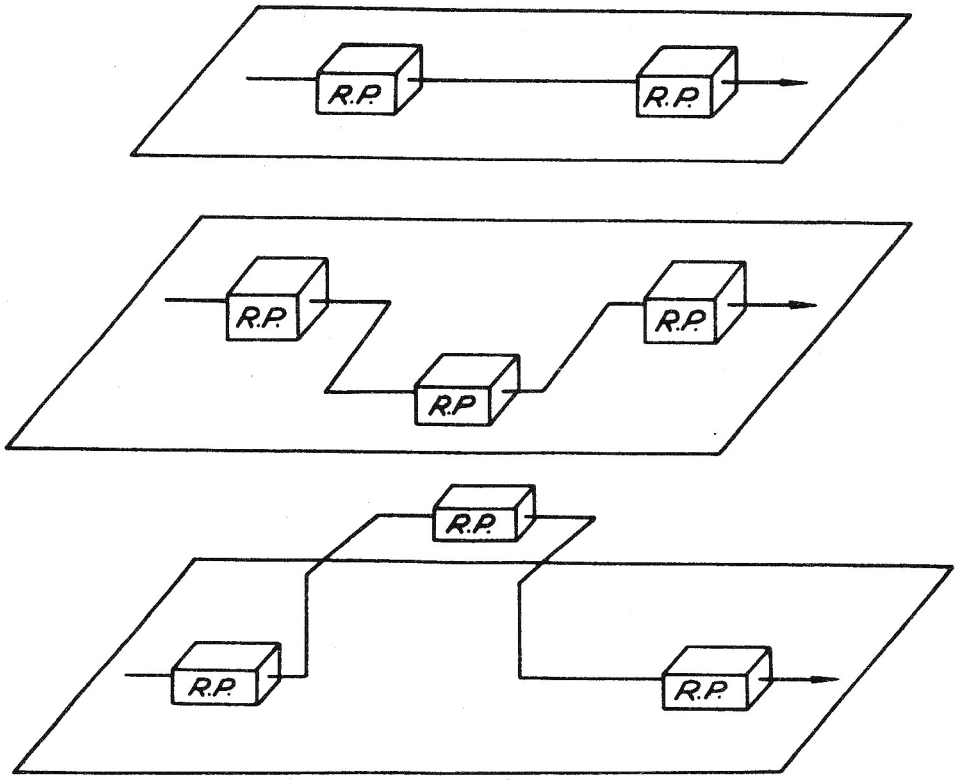
- linijske (M^{L}_{pu});
- ravanske (M^{R}_{pu}) i
- prostorne (M^{P}_{pu}).

Izneta podela shematski je prikazana na slici 6.

Takodje, na primeru kombinacije tri radna prostora, ilustracije radi, na slici 7., prikazana je data podela.



Slika 6.



Slika 7.

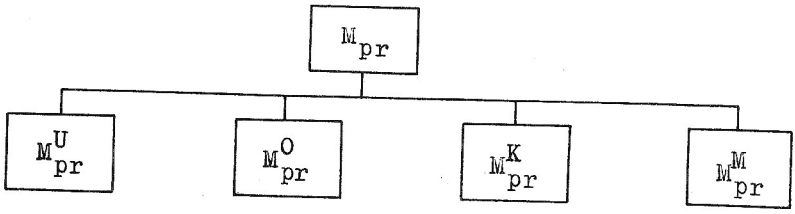
2.1.1.4. Sistemi prostora

Prema prostoru oko radnog prostora, sistemi automatizacije i programskog upravljanja mogu se podeliti na:

- uvodnike (M^{U}_{pr});

- odvodnike (M^{O}_{pr});
- kombinovane, uvodno-odvodne (M^{K}_{pr}) i
- manipulatore u radnom prostoru (M^{M}_{pr}),

što je shematski prikazano na slici 8.



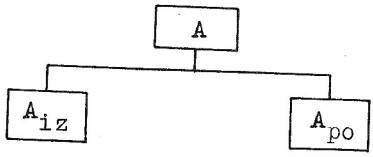
Slika 8.

2.1.2. Alat

Sistemi automatizacije i programskog upravljanja alatima, obzirom na funkciju koju treba da obavljaju, mogu se podeliti u dve vrste, i to:

- sistemi za izmenu alata (A_{iz}) i
- sistemi za podešavanje alata (A_{po}),

pri čemu je ova podela data na slici 9.



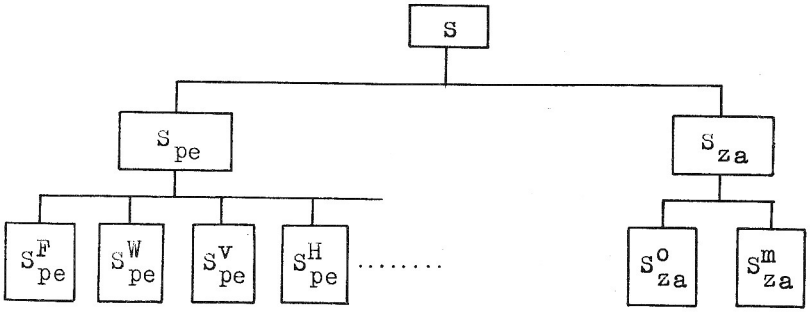
Slika 9.

2.1.3. Mašine

Kako je mašina definisana performansama i zaštitnim uredjajima, to se podela sistema automatizacije i programskog upravljanja može svrstati u dve grupe, i to:

- sistemi za upravljanje režimom rada mašine (S_{pe}) i
- sistemi za upravljanje zaštitom (S_{za}),

što je shematski prikazano na slici 10.



Slika 10.

2.1.3.1. Sistemi režima

U performanse mašine spadaju: nominalna sila, raspoloživi rad, brzina kretanja pritiskivača, hod, i druge veličine, pa se dalja podela može izvršiti na:

- sisteme upravljanja deformacionom silom (S^{F}_{pe});
- sisteme upravljanja deformacionim radom (S^{W}_{pe});
- sisteme upravljanja brzinom (S^{V}_{pe});
- sisteme upravljanja hodom (S^{H}_{pe}), itd.

2.1.3.2. Sistemi zaštite

Na mašinama postoje dve vrste zaštitnih uredjaja, i to: uredjaji za zaštitu opslužioca i uredjaji za zaštitu mašine od preopterećenja i oštećenja. Shodno ovome se i sistemi automatizacije i programskog upravljanja mogu podeliti na:

- sisteme zaštite opslužioca (S^{O}_{za}) i
- sisteme zaštite mašine (S^{m}_{za}).

2.1.4. Uslovi

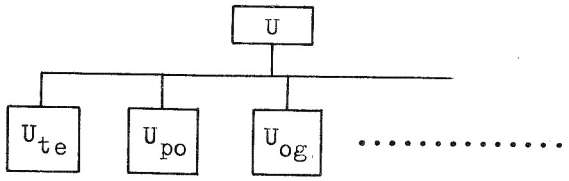
Činioce uslova obrade materijala deformisanjem sačinjavaju parametri koji zavise od sredstava rada, i to: mašine, alata i pomoćnih sredstava. Kako su uslovi, koji proizlaze od mašine i alata obuhvaćeni u poglavljima 2.1.2. i 2.1.3., to se u ovom poglavlju tretiraju, samo, uslovi koje odredjuju pomoćna sredstva rada, a to su: temperatura, podmazivanje, skidanje ogoretine, i sl.

Prema tome, sistemi automatizacije i programskog upravljanja

se dele na:

- sisteme temperature (U_{te});
- sisteme podmazivanja (U_{po});
- sisteme za skidanje ogoretine (U_{og}), itd.

Ova podela je shematski prikazana na slici 11.



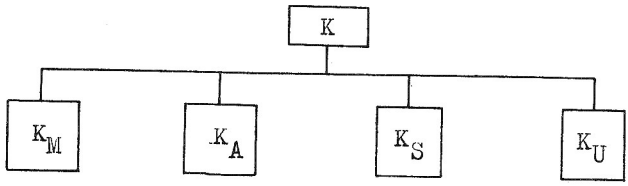
Slika 11.

2.1.5. Kontrola

Sistemi automatske i programski upravljane kontrole se - generalno - mogu svrstati u četiri grupe, i to:

- sistemi kontrole materijala (K_M);
- sistemi kontrole alata (K_A);
- sistemi kontrole mašine (K_S) i
- sistemi kontrole uslova (K_U),

što je shematski prikazano na slici 12.



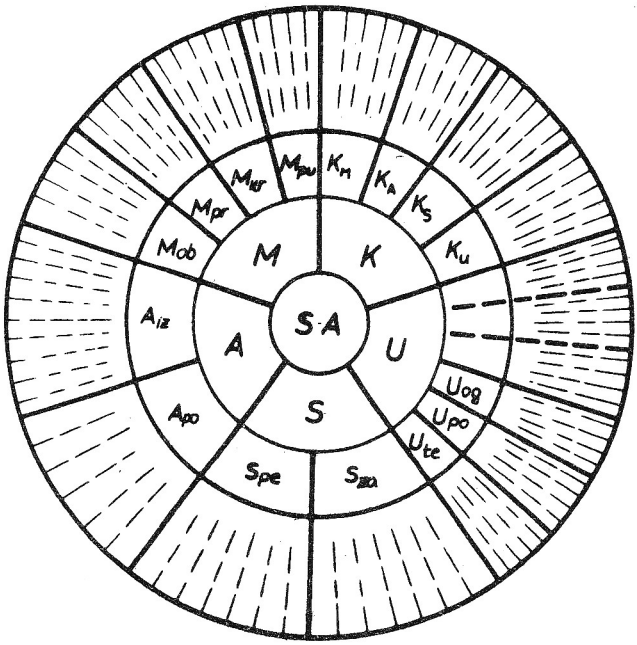
Slika 12.

Dalja podela ovih sistema može se analogno sprovesti prema klasifikacijama iznetim u predhodnim poglavljima.

Na osnovi svega iznetog može se slika 1. proširiti, kako je to prikazano na slici 13., što omogućuje rasčlanjavanje sistema automatizacije i programskog upravljanja do njihovih elemenata.

Sprovedena klasifikacija omogućila je definisanje, kako parci-

jalnih, tako i definisanje ukupnog stepena automatizacije.



Slika 13.

3. STEPEN AUTOMATIZACIJE

Ako se struktuira ukupno vreme procesa obrade materijala deformisanjem, tada se dobija:

$$t_u = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_n = \sum_{i=1}^{i=n} t_i \qquad (1)$$

gde je: t_i - vreme i-te operacije u procesu obrade.

Parcijalno vreme (t_i) se može izraziti kao:

$$t_i = t_s + t_o \qquad (2)$$

gde su: t_s - vreme učešća sredstava rada i

t_o - vreme učešća opslužioca.

Na osnovi izloženog može se definisati parcijalni stepen automatizacije sa:

$$\eta_i = 1 - \frac{t_o}{t_i} \qquad (3)$$

Ako se podje od klasifikacije sistema automatizacije i programskog upravljanja, date u poglavlju 2.1., tada se mogu definisati parcijalni stepeni automatizacije: materijala (η_M), mašine (η_S), alata (η_A), uslova (η_U) i kontrole (η_K) - analogno izrazu (3).

Kada se znaju parcijalni stepeni automatizacije i programskog upravljanja, tada se ukupni stepen automatizacije može izraziti sa:

$$\eta_u = \frac{1}{5}.(\eta_M + \eta_A + \eta_S + \eta_U + \eta_K) \qquad (4)$$

odnosno:

$$\eta_u = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=5} \eta_i \qquad (5)$$

4. ZAKLJUČAK

Na osnovi svega što je izneto mogu se izvući sledeći zaključci, i to:

1. Izneti metod grupisanja i sprovedena klasifikacija sistema automatizacije i programskog upravljanja u oblasti obrade materijala deformisanjem, u najširem smislu te reči, omogućuje lakše i preglednije sagledavanje sa diferencijacijom problema u ovoj oblasti, a time i sveobuhvatnije i svestranije njihovo rešavanje.
2. Definisani ukupni stepen automatizacije i programskog upravljanja omogućuje realnije sagledavanje tehničkog nivoa

pojedinih obradnih sistema, kao i realnije njihovo uporedjivanje.

L i t e r a t u r a:

/1/ P.STANKOVIĆ: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina, II deo, Naučna knjiga, Beograd, 1960.

/2/ TT.GOLOTOWSKI: Prasy mechaniczne, Warszawa, 1971.

/3/ Publikacija "SIMOD", god. III, br. 1., Mašinski fakultet, Niš, 1977.

Popović P.

PRILOG RAZMATRANU PROBLEMA AUTOMATIZACIJE I PROGRAMSKOG UPRAVLJANJA NA MAŠINAMA ZA OBRADU DEFORMISANJEM

R e z i m e

U radu se daje klasifikacija sistema automatizacije i programskog upravljanja na mašinama za obradu deformisanjem u zavisnosti od namene, po kojoj se svi sistemi svrstavaju u pet osnovnih grupa.

Nadalje su definisani, prema postavljenoj klasifikaciji, parcijalni stepeni i - globalni - ukupni stepen automatizacije, čime je stvorena mogućnost realnog ocenjivanja proizvodnih mašina i sistema sa aspekta njihove automatizacije.

BEITRAG DER BETRACHTUNG DES AUTOMATISIERUNGSPROBLEMS UND DER PROGRAMMSTEUERUNG BEI DEN VERFORMUNGSMASCHINEN

Z u s a m m e n f a s s u n g

In dieser Arbeit wird die Klassifikation des Automatisierungssystems sowie der Programmsteuerung bei den Verformungs-Bearbetiungsmaschinen in Abhängigkeit von dem Verwendungszweck gegeben, nach dem alle Steuersysteme in fünf Grundgruppen aufgeteilt werden.

Es sind weiters, gemäss der gestellten Klassifikation die Partiellgrade und der Global-Gesamtautomatisierungsgrad definiert worden, wodurch die Möglichkeit für die reale Schätzung der Fertigungsmaschinen und der Systeme bezüglich ihrer Automatisierung geschaffen wurde.

Stevan Živanović, Milan Jurković *)

UPOREDJENJE UTICAJA MATERIJALA OBRADKA I TEHNOLOŠKIH PARAMETARA NA TRAJNOST ALATA ZA DEFORMACIONO RAZDVAJANJE * *)

1. U v o d

Povećanjem trajnosti alata za obradu deformisanjem znatno se smanjuju troškovi proizvodnje, obzirom da je učešće ove vrste alata u ukupnim troškovima proizvodnje mnogo izraženije nego što je to slučaj sa alatom za obradu skidanjem strugotine. Imajući u vidu da je medju deformacionim alatom najizraženija brojčano grupa alata za razdvajanje (prosjecanje i probijanje), sasvim je razumljivo što se problemom trajnosti ove vrste alata bavio znatan broj istraživača.

+) Dr Stevan Živanović, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Banjaluci

Mr Milan Jurković, docent Mašinskog fakulteta Univerziteta u Banjaluci

+ +) Rad obuhvata dio istraživanja u okviru republičke naučne teme "Primjena novih konstrukcija i tehnologija izrade alata za obradu lima deformisanjem", koju finansiraju Republička zajednica za naučni rad SRBiH i "Rudi Čajavec" u Banjaluci.

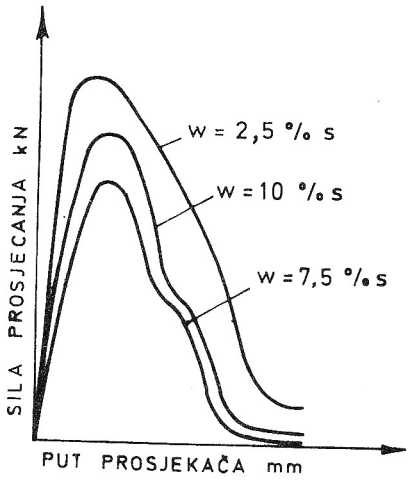
Zamjenom alatnih čelika tvrdim metalima za izradu reznih elemenata alata uspjelo se višestruko povećati trajnost alata. Medjutim za taj uspjeh treba platiti veću cijenu, a to za serijnosti ispod odredjenog broja izradaka vodi ka povećanju troškova proizvodnje. Iz tog razloga i nadalje su aktuelna istraživanja trajnosti alata čiji su rezni elementi od alatnog čelika.

I pored znatnog broja istraživača, koji su se bavili ovim problemom, nisu dobijeni zadovoljavajući algoritmi, koje bi mogli koristiti konstruktori i tehnolozi alata za deformaciono razdvajanje. Istraživači /1/,/2/,/3/,/4/,/5/, koji su najdalje otišli u postavljanju problema ukazuju na njegovu složenost usljed prisutnosti znatnog broja faktora koji utiču na trajnost alata za razdvajanje.

Autori ovog rada koriste u istraživanju trajnosti alata za deformaciono razdvajanje posrednu metodu /6/,/7/, uz istovremeno kompariranje rezultata dobijenih tom metodom sa rezultatima iz eksploatacionih uslova, tj. rezultatima dobijenih praćenjem trajnosti alata u neposrednim proizvodnim uslovima. (Komparativni rezultati biće objavljeni u zasebnom radu) Obzirom na zadovoljavajuću podudarnost rezultata dobijenih posrednom i neposrednom metodom, može se u daljim istraživanjima veoma uspješno koristiti posredna metoda, koja vrijeme neophodnih istraživanja skraćuje za nekoliko hiljada puta, tj. sa nekoliko mjeseci na svega jedan sat.

Posredna metoda se sastoji u praćenju maksimalne sile razdvajanja /6/ umjesto dugotrajnog mjerenja trošenja reznih elemenata alata u eksploatacionim uslovima. Ova nova metoda bazira na činjenici (sl.1) da trajnost alata zavisi od deformacionog rada (površine ispod krivih linija), a rad od maksimalne sile razdvajanja (prosjecanja) F_{max}.

Na sl.1 prikazan je uticaj zazora "w" na veličinu F_{max} razdvajanja. Medjutim ne vidi se sa kojom brzinom je vršeno deformaciono razdvajanje i kako brzina prosjecanja "v" utiče na F_{max}. Takodje se ne vidi da li je proces obavljen bez podmazivanja reznih elemenata alata i lima ili sa podmazivanjem. U koliko je sa podmazivanjem, onda koje je mazivo korišćeno, i kako



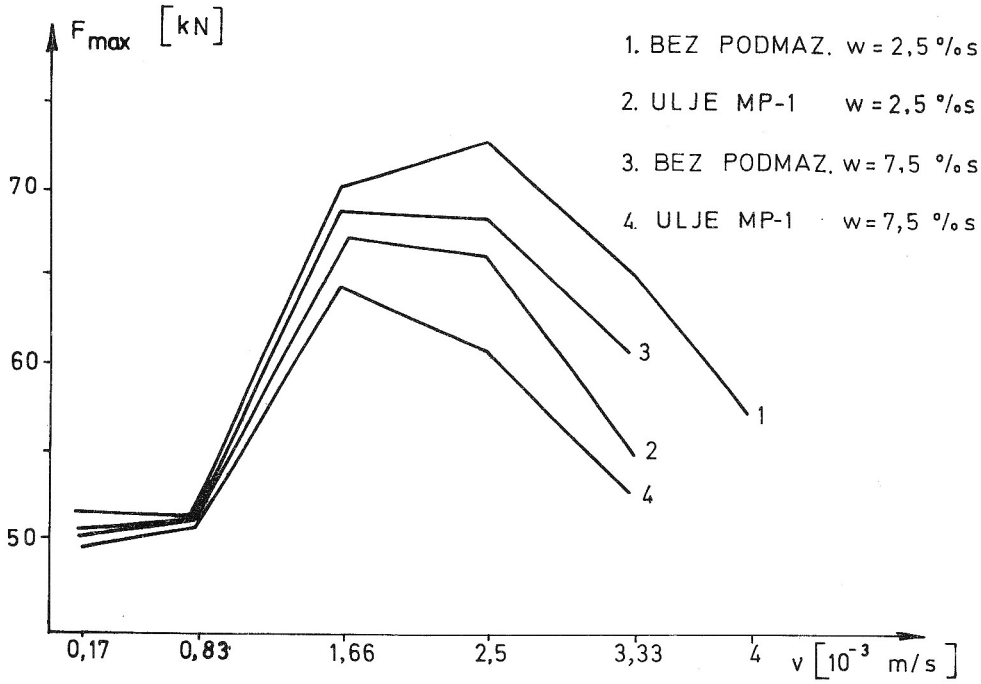
Sl.1. Zavisnost sile razdvajanja od zazora

podmazivanje utiče na F_{max}. Nije rečeno ni koji je materijal prosjecan, i kako on utiče na F_{max}. Najzad se postavlja pitanje korelacije svih navedenih faktora. U cilju dobijanja odgovora na postavljano pitanje neophodno je izvršiti variranje svih navedenih faktora.

2. Variranje tehnoloških parametara

Za ilustrativni primjer izabran je čelik Č 0147 kao materijal obradka. Izvršeno je variranje sva tri osnovna tehnološka parametra: zazora (w), brzine razdvajanja (v) i vrste maziva (m). U eksperimentu je korišćen mnogo veći broj zazora i više tehnoloških ulja /7/.

Iz praktičnih razloga prikazani su na sl. 2 rezultati za proces bez podmazivanja i sa podmazivanjem uljem domaće proizvodnje MP-1, dobijenog na bazi segmenta istraživanja u okviru navedene republičke teme. Taj segmenat istraživanja se odnosio na teoriju dvojnog optimuma, koja je po prvi put uvedena (autorima nije poznat takav pojam u literaturi) pri razmatranju deformacionog razdvajanja /6/.



Sl. 2. $F_{max} = f(w,v,m)$ za Č 0147

Takodje radi veće preglednosti na sl. 2.su prikazani rezultati samo za jedan od malih zazora (w=2,5 % s) i za takozvani "prvi optimum" (w=7,5 % s) /6/ /7/.

Vrijednosti funkcije sa najvećim F_{max} predstavljaju takozvane "antioptimalne brzine razdvajanja", tj. takve brzine pri kojima će nesumnjivo doći do najintenzivnijeg trošenja reznih elemenata alata.

Karakter funkcija prikazanih na sl.2. sugeriše ideju matematiziranja razmatrane korelacije. Kao ulaz u takav proces može se usvojiti da za v=0,0009 m/s zazor i vrsta maziva ne utiču na F_{max}. Odavde slijedi da sve četiri funkcije imaju zajedničku tačku za vrijednost apscise v=0,0009 m/s i F_{max}=51,5 kN.

Posmatrajući funkcije na sl.2. dolazi se do zaključka da aproksimaciju prikazanih linija predstavljaju linije drugog reda i da su u tu svrhu najpodesnije parabole. Takva familija parabola imala bi slijedeći matematski oblik

$$F_{max} = a\,v^2 + b\,v + c \qquad (1)$$

Za odredjivanje konstante "c" treba diferencirati jednačinu (1)

$$\frac{dF_{max}}{dv} = 2\,a\,v + b$$

Rješenje ove diferencijalne jednačine je

$$F_{max} = a\,v^2 + b\,v + C \qquad (2)$$

Konstanta integralenja C definisana je preko graničnog uslova, koji se odnosi na zajedničku tačku svih parabola, tako da će biti

$$C = -8{,}1 \cdot 10^{-7}\,a - 9 \cdot 10^{-4}\,b + 51{,}5 \qquad (3)$$

Unošenjem vrijednosti konstante C iz jednačine (3) u jednačinu (2) dobija se opšti oblik familije razmatranih parabola.

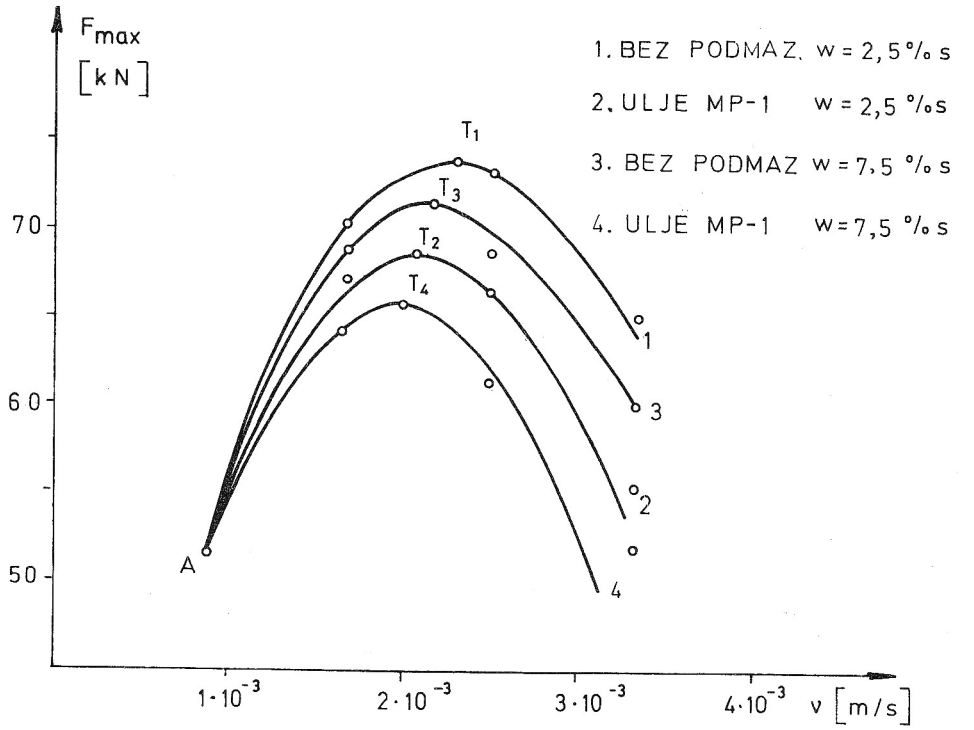
$$F_{max} = a\,v^2 + b\,v^2 - 8{,}1 \cdot 10^{-7}\,a - 9 \cdot 10^{-4}\,b + 51{,}5 \qquad (4)$$

Koeficijenti "a" i "b" u jednačini (4) mogu biti prikazani u funkciji od zazora ivrste podmazivanja

$$a = \left(\frac{w}{2}\right)^{k_1 m_1} \qquad b = \left(\frac{w}{2}\right)^{k_2 m_2}$$

tako da jednačina (4) dobija oblik

$$F_{max} = \left(\frac{w}{2}\right)^{k_1 m_1} v^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^{k_2 m_2} v - 8{,}1 \cdot 10^{-7}\left(\frac{w}{2}\right)^{k_1 m_1} - 9 \cdot 10^{-4}\left(\frac{w}{2}\right)^{k_2 m_2} + 51{,}5 \qquad (5)$$



Sl. 3. Parabolične funkcije za Č 0147

Konkretizovanjem jednačine (5) za parabolu "1" (bez podmazivanja), gdje je $m_1 = m_2 = 1$, dobiće se

$$F_{max} = \left(\frac{w}{2}\right)^{k_1} v^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^{k_2} v - 8{,}1 \cdot 10^{-7} \left(\frac{w}{2}\right)^{k_1} - 9 \cdot 10^{-4} \left(\frac{w}{2}\right)^{k_2} + 51{,}5 \qquad (6)$$

Eksponente k_1 i k_2 nalazimo iz uporedjenja jednačina (6) i (4) uz pripisivanje odredjenoj tački funkcije njene koordinate.

Najzad parabola "1" definisana je matematski pomoću slijedećeg obrasca

$$F_{max} = -\left(\frac{w}{2}\right)^{10,94} v^{2} + \left(\frac{w}{2}\right)^{17,78} v + \left(\frac{w}{2}\right)^{11,59} \qquad (7)$$

Analogno mogu se odrediti obrasci i za ostale parabole.

Nalazeći ovisnost intenziteta trošenja reznih elemenata alata za razdvajanje od F_{max}, što se postiže uporedjenjem laboratorijskih i eksploatacionih istraživanja, može se definisati zavisnost intenziteta trošenja alata T od brzine razdvajanja "v", zazora "w" (dvostrani) i vrste maziva "m"

$$T = f(v, w, m)$$

Ovaj razradjeni primjer odnosi se na Č 0147. Za druge vrste materijala treba tražiti rješenja oslanjajući se na karakteru dotičnih funkcija.

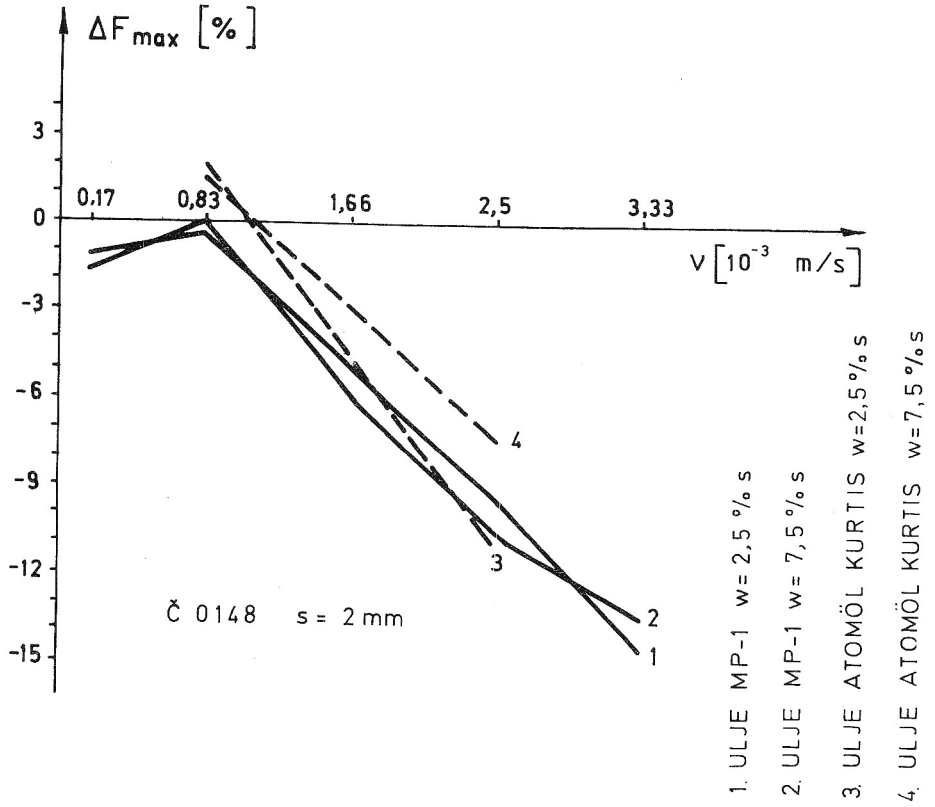
3. Komparativni uticaj materijala obradka na trajnost alata

U cilju uporedjenja uticajnosti pojedinih materijala obradka u zavisnosti od tehnoloških parametara na maksimalnu silu razdvajanja F_{max}, a samim tim na trajnost reznih elemenata alata, problem je razmatran u sistemu $\Delta F_{max} - v$ uz variranje zazora w i vrste tehnološkog ulja. Na sl. 4. prikazane su grafički takve funkcije za Č 0148, pri čemu je

$$\Delta F_{max} = \frac{F_{max\ MP\text{-}1} - F_{max\ bez\ podmazivanja}}{F_{max\ bez\ podmazivanja}} 100$$

Uporedjenjem uticaja dvije prikazane vrste ulja (domaće MP-1 i uvozno Matoměl Kurtis) na smanjenje F_{max}, uočava se da ulje MP-1 daje u osnovi bolje rezultate u razmatranom području brzina razdvajanja i zazora, s tim što su za veće zazore ti rezultati bolji.

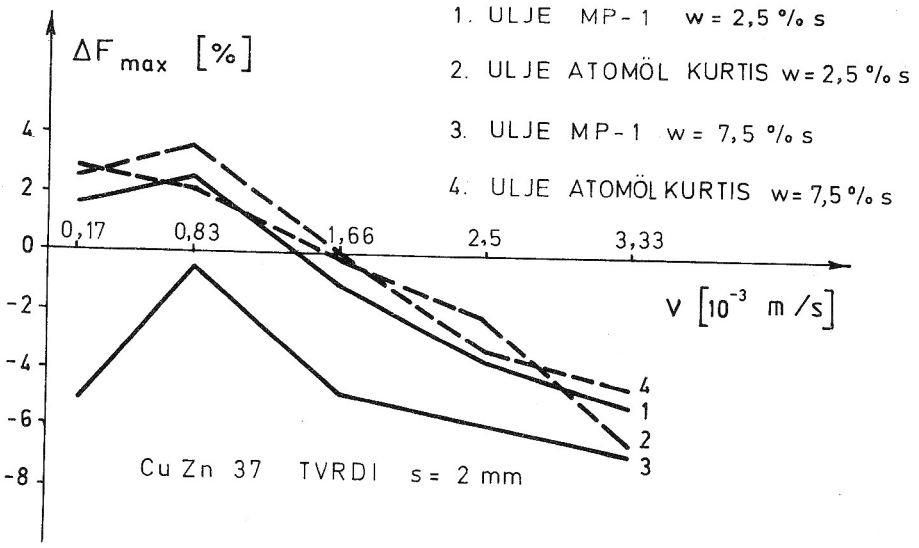
Na sl. 5. prikazan je uticaj tehnoloških faktora na smanjenje F_{max} za mesing Cu Zn 37 tvrdi.



Sl. 4. Uticaj tehnoloških faktora na smanjenje F_{max} za Č 0147

Ovdje je obratno nego što je kod čelika, tj. primjena ulja Atoměl Kurtis daje bolje rezultate nego ulje MP-1. Zatim se primjećuje, da promjena veličine zazora utiče znatno kod ulja MP-1, a kod ulja Atoměl Kurtis taj uticaj je neznatan.

Na sl. 6. prikazan je uticaj tehnoloških faktora na smanjenje F_{max} za aluminij Al 99,5 polutvrdi. Uočavamo, da za veoma male brzine razdvajanja bolje je ulje MP-1, a za veće (u razmatranom području brzina razdvajanja) bolje je uvozno ulje Atoměl Kurtis.



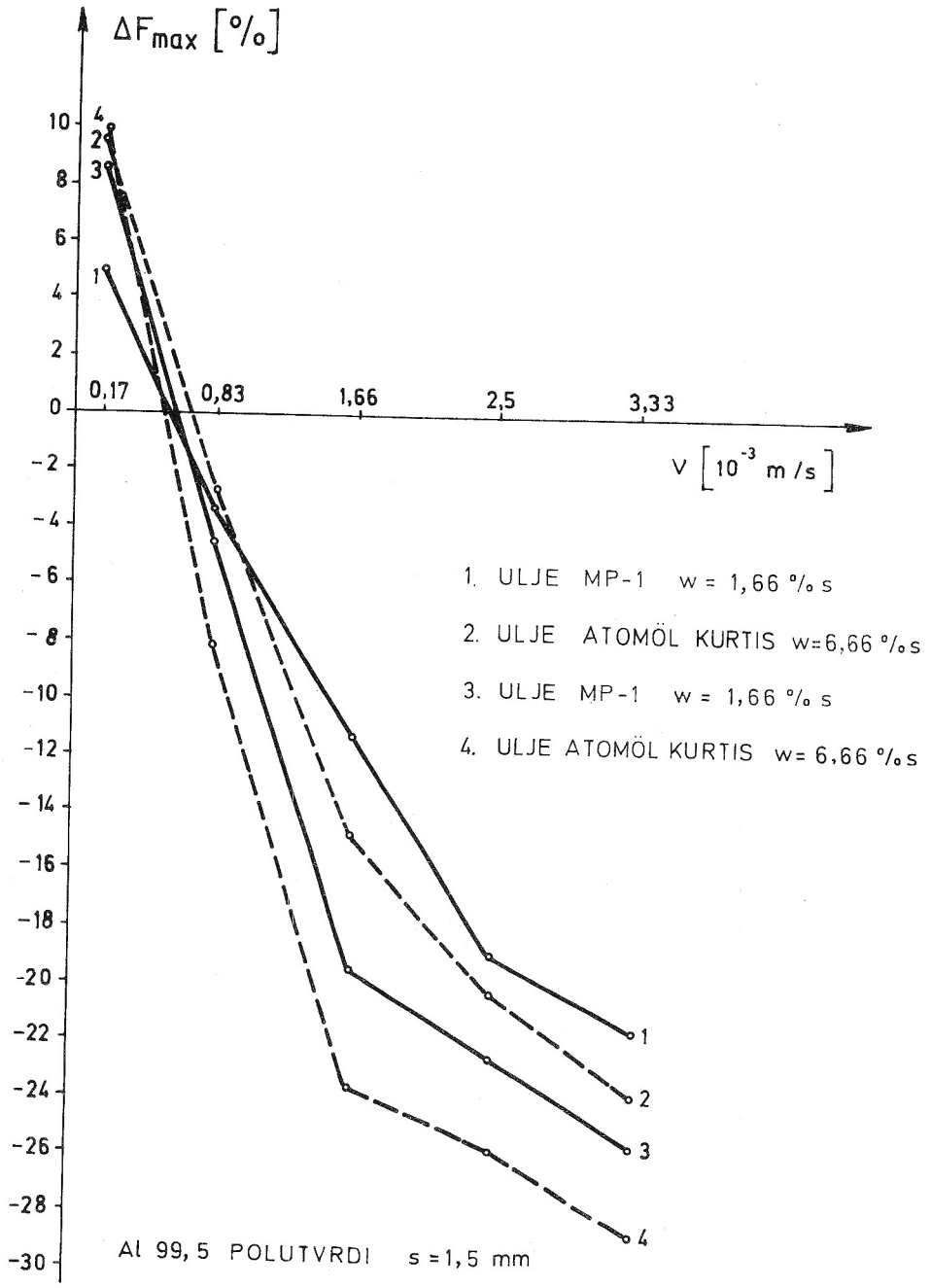
Sl. 5. Uticaj tehnoloških faktora na smanjenje F_{max} za Cu Zn 37

Na sl. 7. prikazan je komparativno uticaj brzine razdvajanja za ulje MP-1 na smanjenje F_{max} za čelik, mesing i aluminij, pri zazoru za čelik i mesing w = 7,5 % s i za aluminij w = 6,66 % s.

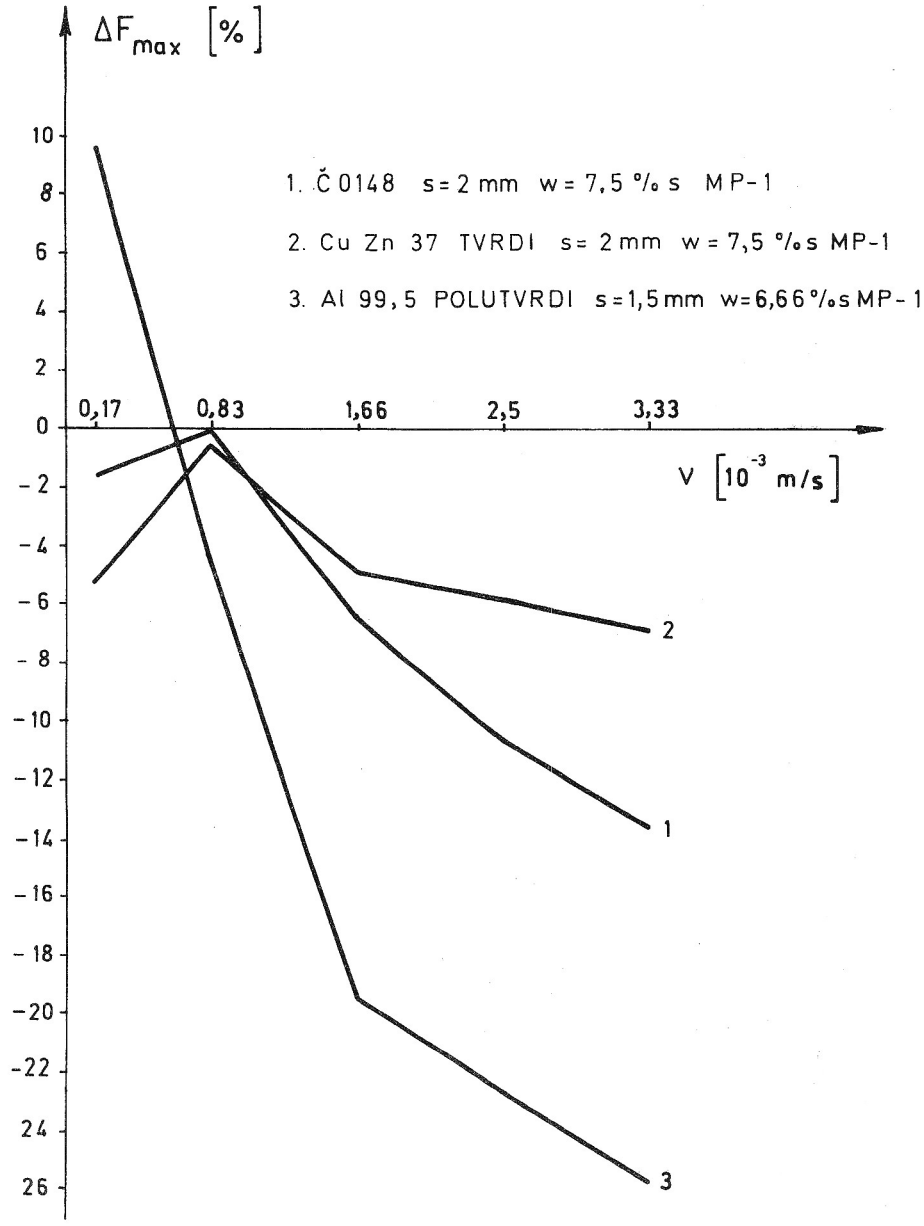
Na sl. 8. prikazan je komparativni uticaj brzine razdvajanja za ulje MP-1 na smanjenje F_{max} za čelik, mesing i aluminij, pri zazoru za čelik i mesing w = 2,5 % s i za aluminij w = 1,66 % s.

4. Z a k l j u č a k

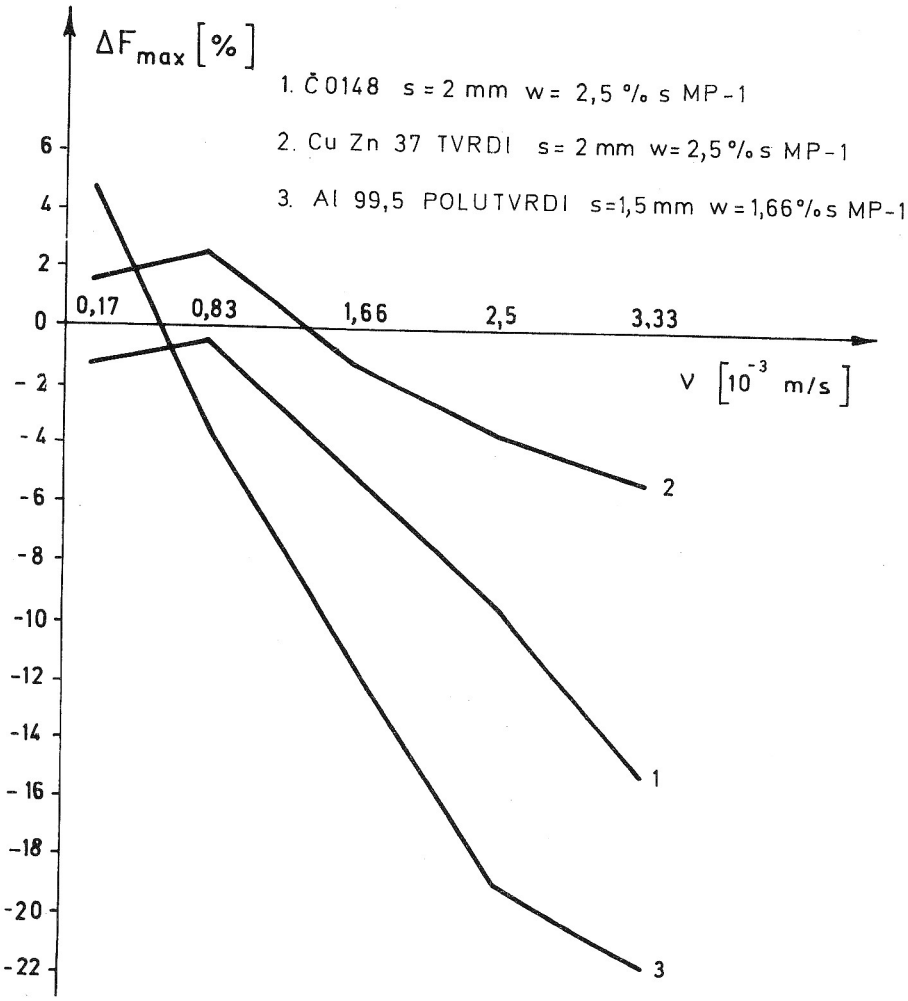
Na osnovu analize podataka dobijenih eksperimentalnim putem u procesu prosjecanja, pri variranju materijala obradka i tehnoloških parametara procesa, proizilaze slijedeći zaključci:



Sl. 6. Uticaj tehnoloških faktora na smanjenje F_{max} za Al 99,5



Sl. 7. Komparacija smanjenja F_{max} za optimalne zazore



Sl. 8. Komparacija smanjenja F_{max} za male zazore

1. Proces trošenja reznih elemenata alata može se pratiti uspješno posrednom metodom, tj. preko maksimalne sile prosjecanja ili probijanja /6/, /7/.

2. Svaki od razmatranih tehnoloških parametara (zazor -w, brzina razdvajanja -v i vrsta maziva -m) utiče na trajnost reznih elemenata alata za razdvajanje.

3. Intenzitet uticaja pojedinog tehnološkog parametra zavisi od veličine drugih parametara. To znači da postoji odredjena korelacija uticaja tehnoloških parametara na trajnost alata.

4. U odnosu na odredjeni materijal obradka korelacija uticaja tehnoloških parametara može biti definisana striktno matematski, tj. postoji odredjeni matematski model. Takav model za Č 0147 prikazan je na sl. 3.

5. U razmatranom području brzina razdvajanja postoji takozvani "antioptimum" u odnosu na trajnost reznih elemenata alata (tačka "T" sl. 3).

6. Vrsta materijala obradka snažno utiče na intenzitet trošenja reznih elemenata alata (sl.4, 5 i 6).

7. Uticaj tehnoloških parametara na trajnost reznih elemenata alata zavisi od vrste materijala. Najjača izražajnost korelacije uticaja tehnoloških parametara na trajnost alata i vrste materijala obradka pojavljuje se kod aluminija.

8. Za praćenje korelacije vrste materijala obradka i tehnoloških parametara u odnosu na njihov uticaj na trajnost alata, veoma je podesan sistem ΔF_{max} - v (obrazac u tački 3). U ovom sistemu dobija se sasvim pregledna slika komparativnog stanja (sl.7 i 8).

9. Tehnološka ulja za deformaciono razdvajanje treba primjenjivati zavisno od vrste materijala, veličine primjenjivanog zazora i brzine razdvajanja.

10. U izvjesnim brzinskim područjima, brzina razdvajanja

jače utiče na trajnost alata nego zazor ili vrsta maziva, stoga treba izbjegavati antioptimalne brzine razdvajanja, čija lokacija zavisi od vrste materijala obradka.

L i t e r a t u r a

/1/ LANGE K., Lechrbuch der Umformtechnik, Band 3, Blechumformung. Springer-Verlag, Berlin, 1975.

/2/ DALLAS D., Tool and Manifacturing Engineers Handbook, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1976.

/3/ MIHALENKO P.F., Stojkost razdelitel'nyh štampov, Moskva, 1976.

/4/ ROSSI M., Stampaggio a freddo delle lamiere, Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1979.

/5/ NOVOTNY J., LANGER Z., Střihaníla další způsoby dělení kovových materiálů, Praha, 1980.

/6/ ŽIVANOVIĆ S., Usavršavanje procesa prosjecanja i probijanja kroz primjenu teorije dvojnog optimuma. XIV savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, 2. knjiga s. 448 - 459. Čačak, 1980.

/7/ ŽIVANOVIĆ S., Korelacija dvojnog optimuma i podmazivanja u procesu prosjecanja. Obrada deformisanjem u mašinstvu br. 6, s. 45-56. Novi Sad, 1980.

ŽIVANOVIĆ S., JURKOVIĆ M.

UPOREDJENJE UTICAJA MATERIJALA OBRADKA I TEHNOLOŠKIH PARAMETARA NA TRAJNOST ALATA ZA DEFORMACIONO RAZDVAJANJE

R e z i m e

Veličina uticaja tehnoloških parametara na trajnost alata za deformaciono razdvajanje zavisi od vrste materijala. Tehnološka ulja za prosjecanje i probijanje treba primjenjivati zavisno od vrste materijala obradka, veličine zazora i brzine razdvajanja. Za svaki materijal postoji specifična antioptimalna brzina razdvajanja, koju treba izbjegavati.

COPARASION INFLUENCE OF MATERIAL OF BLANK AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON DURABILITY OF TOOLS FOR BLANKING AND PUNCHING

S u m m a r y

Size of influence of technological parameters on durability of tools for blanking and punching depends on kind of material of blank. Technological oils for blanking or punching one should apply according to kind of material of blank, size of clearance, and speed of blanking or punching. For each material exists a specific antioptimal speed of blanking, which one must avoid.

MATEMATIČKI PRIKAZ RAČUNANJA PO VIZIOPLASTIČNI METODI HLADNO IZTISNJENOG ROTACIJSKI SIMETRIČNOG OBLIKA

dr. Peter LEŠ, mag. dipl.ing., dr. Andro ALUJEVIČ, mag. dipl.ing.
Visoka tehnična šola v Mariboru - Smetanova 17

1. U V O D

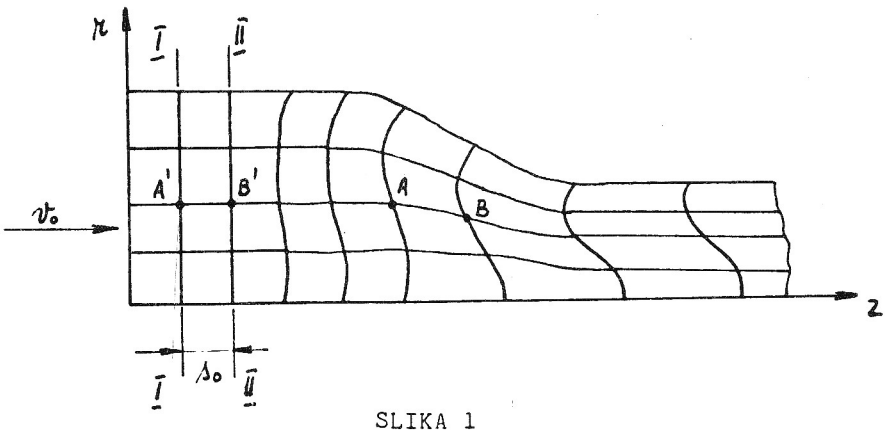
Pomoću deformacijske mreže po presjeku rotacijsko simetričnog izratka, opisuju točke ucrtanih kvadrata prije i deformirani elementi poslije preoblikovanja elementarne deformacije. Mjerenjem veličine deformacije i uz poznate rubne uvjete moguče je preračunavanja i drugih nepoznatih veličina kao što su brzine deformacije, naprezanje, temperaturne promjene i slično.

2. P R I N C I P R A Č U N A N J A P O V I Z I O P L A S T I Č N O J M E T O D I

2.1 U stacionarnom dijelu linija X-X pređe u vremenu $\Delta t = \frac{v}{\Delta so}$ u liniju x' - x'. U istom vremenu putuje točka A' u točku B'. Ako je projekcija puta AB na obe osi (r i z) označena sa Δs_r i Δs_z tada su komponente brzine tačaka

$$V_r = \frac{\Delta s_r}{\Delta t} \quad \text{i} \quad V_z = \frac{\Delta s_z}{\Delta t} \tag{1}$$

koje su toliko točnije što finije je izabrana početna kvadratna mreža.



SLIKA 1

Kod nestacionarnih procesa (npr. u zoni deformacije) dobijemo brzine na sličan način s time da po mogućnosti uzimamo još finiju mrežu. Da bi odredili deformacione brzine a iz toga i druge veličine postoji više načina.

2.1.1 Ako prenosimo za svaku točku komponente brzine V_r i V_z na ose r i z i vrijednosti povežemo u krivulju tada dobijemo iz uspona ovih krivulja deformacione brzine iz slijedečih izraza:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \qquad \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \qquad \dot{\varepsilon}_\vartheta = \frac{V_r}{r}$$

$$\dot{\varepsilon}_{rz} = 1/2 \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}\right) \tag{2}$$

i u usporedbenu deformacionu brzinu

$$\dot{\varepsilon}_v = \sqrt{2/3 \left(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\vartheta^2 + 2\,\dot{\varepsilon}_{rz}\right)} \tag{3}$$

Pošto su komponente deformacionih brzina proporcionalne komponentama deviatora naprezanja možemo zapisati slijedeče izraze:

$$\dot{\varepsilon}_r = \lambda (\sigma_r - \sigma_m)$$

$$\dot{\varepsilon}_z = \lambda (\sigma_z - \sigma_m)$$

$$\dot{\varepsilon}_\vartheta = \lambda (\sigma_\vartheta - \sigma_m) \qquad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rz} = \lambda \tau_{rz}$$

pri tome je proporcionalni faktor

$$\lambda = \frac{\sqrt{3}}{2k} \cdot \dot{\varepsilon}_v \qquad (5)$$

i σ_m srednja normalno naprezanje

$$\sigma_m = 1/3 \, (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\vartheta) \qquad (6)$$

a za početnu vrijednost $\sigma_z = 0$ je

$$\sigma_m = -\frac{\dot{\varepsilon}_z}{\lambda} \qquad (7)$$

Ako eliminiramo iz dviju gornjih jednadžbi (4) za ravninsko deformaciono stanje srednje normalno naprezanje tada je npr. sa novom oznakom indeksa:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_x &= \lambda (\sigma_x - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_y &= \lambda (\sigma_y - \sigma_m) \end{aligned}\right\} \dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y = \lambda (\sigma_x - \sigma_y) \qquad (8)$$

i iz toga dobijemo traženi napon

$$\sigma_x = \sigma_y + \frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda} \qquad (9)$$

Deriviranjem zadnje jednadžbe po y dobijemo

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial}{y} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) \tag{10}$$

Iz jednadžbe ravnoteže $\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$ slijedi

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) \tag{11}$$

što uvrštenjem u gornju jednadžbu (10) daje slijedeći oblik

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) \tag{12}$$

ili

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) \tag{13}$$

A integriranjem ove diferencialne jednodžbe dobije se konačan oblik za traženo naprezanje

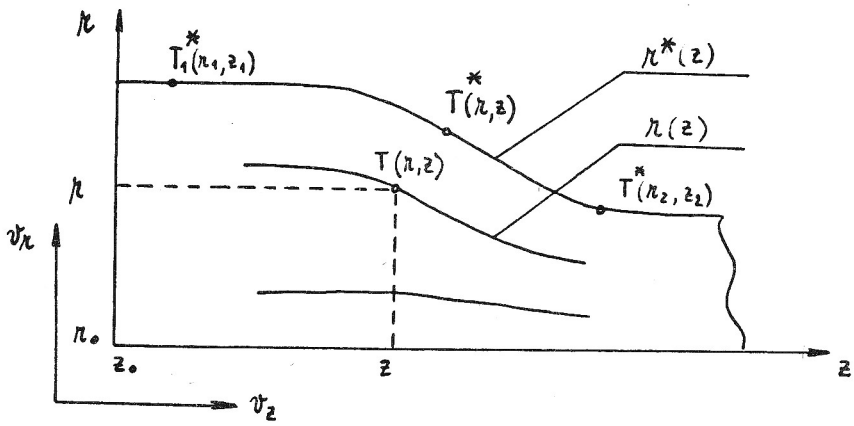
$$\sigma_x = \int_{y_1}^{y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) \right) dy + K(x) \tag{14}$$

2.1.2 Druga mogućnost izračunavanja deformacionih brzina i naprezanja po vizioplastičnoj metodi postoji u tome, da razpored̄enost komponenata brzine v_r i v_z aproksimiramo strujnom funkciom, koja sadrži brzinske komponente v_r (r,z) v_z (r,z) i prolazi kroz točku T(r,z).
Za primjer istiskivanja rotacijsko simetričnog oblika možemo strujnu krivulju opisati arc tg funkciom:

$$r(z) = r_o - \text{arc tg } (z - z_o) , \tag{15}$$

koja razvijena u red ima slijedeći oblik

$$r(z) = r_o - \left((z-z_o) - \frac{(z-z_o)^3}{3} + \frac{(z-z_o)^5}{5} - \ldots + \frac{(-1)^n (z-z_o)^{2n+1}}{2^{n+1}}\right) \qquad (16)$$



SLIKA 2

Rubna krivulja $r^*(z)$ ima sličan oblik.

Ako sa metodom najmanjih kvadratnih grešaka

$\left(F = \sum \left((r^*(z) - r(z)\right)^2 \geqslant 0\right)$ i slobodnim parametrima A_{ij} nađemo takvu funkciju koja odgovara svim strujnim funkcijama i rubnim uvjetima kao što je npr. strujna funkcija za naš primjer, koja ima oblik:

$$\Psi = \Psi_o \cdot \frac{r^2}{r^*(z)^2} + \left(r^2 - r^*(z)\right) \cdot \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} \cdot A_{ij} \cdot r^{2i+2} \cdot z^{j+1}, \qquad (17)$$

tada možemo iz ove strujne funkcije izračunati i komponente brzine v_r i v_z:

$$v_r = \frac{2\Psi_o \cdot r}{r^*(z)^3} \cdot \frac{\partial r^*(z)}{\partial z} + 2r^*(z) \cdot \frac{\partial r^*(z)}{\partial z} \cdot \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} \cdot A_{ij}\, r^{2i+1} z^{j+1} -$$

$$-\left(r^2-r^*(z)^2\right).\sum_{i=0}^{I}\sum_{j=0}^{J}\cdot A_{ij}(j+1)r^{2i+1}.z^j \qquad (18)$$

$$v_z = \frac{2\psi_o}{r^*(z)^2} + 2\cdot\sum_{i=0}^{I}\sum_{j=0}^{J}\cdot A_{ij}{}^{2i+2}z^{j+1}\left(r^2-r^*(z)^2\right).\sum_{i=0}^{I}\sum_{j=0}^{J}.$$

$$\circ\ A_{ij}\ (2i+2)r^{2i}\ z^{j+1} \qquad (19)$$

Derivacijom ovih dviju funkcija (18 in 19) po r in po z možemo dobiti deformacione brzine $\dot{\varepsilon}_r$, $\dot{\varepsilon}_z$, $\dot{\varepsilon}_{rz}$, po izrazima (2) i iz njih naprezanje σ_r i σ_z:

$$\sigma_r = \sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N} B_{mn}.n\ (n-1)\ r^{2m+2}.z^{n-2} + \sum_{p=0}^{P}\sum_{q=0}^{Q}.C_{pq}r^{2p}.z^q \qquad (20)$$

i

$$\sigma_z = \sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N} B_{mn}(2m+3)(2m+2).r^{2m}.z^n \qquad (21)$$

Za svaku točku deformacionog prostora.

U zadnjim izrazima (20,21) su B_{mn} i C_{pq} slobodni parametri.

L I T E R A T U R A:

1. LEŠ P.: Povezanost izmedu naprezanja i deformacija u plastičnom području za izotropne nekompresibilne materije
Obrada deformisanjem u mašinstvu br. 6 str. 26, Novi Sad 1980

2. LEŠ P.: Zakonitosti plastičnog tečenja za kompresibilne materije
Obrada deformisanjem u mašinstvu br. 6. str. 20, Novi Sad 1980

3. LANGE K.: Lehrbuch der Umformtechnik, Band 1, 2, 3
Springer Verlag 1972-1974

4. GEIGER M.: Näherungsrechnung zur Ermitlung des Spannungs und Bewegungszustandes beim Fliessen eines Starrplastischen Werkstoffes. Ind. Anz. 89 (1967) Nr. 81 (str. 1778-1781)

5. STECK E.: Numerische Behandlung von Verfahren der Umformtechnik
Berichte aus dem IFU Nr. 22 / 1971, Verlag Girardet - Essen

NEKI REZULTATI ISTRAŽIVANJA UTICAJA TRENJA NA KONTAKTNOJ POVRŠINI IZVLAKAČA I OBRATKA NA PROCES DUBOKOG IZVLAČENJA SA REDUKCIJOM DEBLJINE ZIDA [x]

MR HIMZO DJUKIĆ, docent Mašinskog fakulteta Univerziteta "Džemal Bijedić" u Mostaru

DR PREDRAG POPOVIĆ, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu

1. UVOD

U radu 2 je data teorijska analiza uticaja koeficijenta trenja na kontaktnoj površini izvlakača i obratka na deformacionu silu i naponsko stanje u materijalu, pri čemu su rasmatrane specifičnosti procesa dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine debljine zida omotača predmeta rada po visini. U ovom radu su dati rezultati eksperimentalnih istraživanja.

Primenjujući metodu višefaktornog planiranja eksperimenta, u radu je dat matematički model za izračunavanje deformacione sile izvlačenja, pri izvlačenju dvostepenim alatima.

---

[x] Ovaj rad predstavlja deo Naučno-istraživačkog projekta: ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ METODA PROJEKTOVANJA I PRORAČUNA TEHNOLOGIJE IZRADE CILINDRIČNIH ELEMENATA METODOM DUBOKOG IZVLAČENJA SA REDUKCIJOM DEBLJINE ZIDA OMOTAČA PO VISINI, u čijem finansiranju učestvuju Republička zajednica nauke Bosne i Hercegovine i Radna organizacija "Igman" iz Konjica.

2. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna istraživanja uticaja koeficijenta trenja na kontaktnoj površini izmedju izvlakača i obratka na deformacionu silu izvlačenja, izvršena su u laboratorijskim uslovima, korišćenjem hidrauličke kidalice "Amsler", nominalne sile 300 KN. Kao pripremak je poslužio cilindrični elemenat prečnika 26,4 mm i visine 40 mm, od CuZn28. Unutrašnji prečnik pripremka se menjao od 22 mm do 23 mm, posmatrano od dna ka vrhu.

Pre izvlačenja je izvršeno žarenje, pranje i podmazivanje pripremka.

Merenjem tvrdoće posle žarenja ustanovljena je srednja vrednost tvrdoće omotača od 61,2 HV_3.

Opiti su vršeni korišćenjem dvostepenih alata, koji se koriste u proizvodnji, pri čemu je izvlakač bio prilagodjen raspoloživom radnom prostoru hidrauličke kidalice.

Da bi se odredio uticaj koeficijenta trenja (μ_2) na silu izvlačenja, izvršeno je snimanje zakona promene sile prema usvojenom planu eksperimenta, datom u tabeli 1.

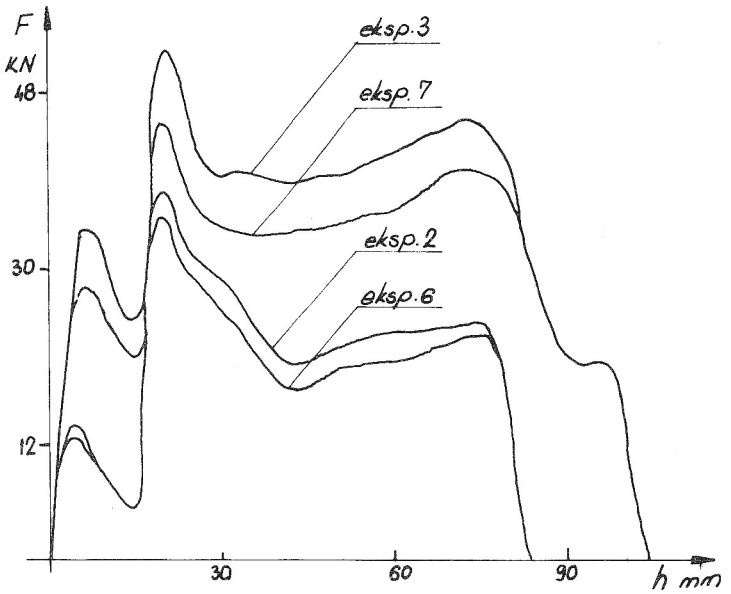
Tabela 1.

Veličina	Broj eksperimenta							
	1	2	3	4	5	6	7	8
d_1 mm	24,6	25,1	23,8	24,2	24,6	25,1	23,8	24,2
d_2 mm	23,38	23,80	23,38	23,80	23,38	23,80	23,38	23,80
μ_2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Kako se iz tabele 1. vidi, izradci su imali spoljašnje prečnike 23,38 mm, odnosno 23,80 mm, zavisno od rednog broja eksperimenta. Unutrašnji prečnik izratka se menjao od 20,3 mm do 22,4 mm. Da bi se što jasnije uočio uticaj koeficijenta trenja (μ_2), prva četiri opita su vršena bez podmazivanja izvlakača i unutrašnje površine pripremka, dok je u naredna četiri eksperimenta obavljeno podmazivanje mašinskim uljem.

Svi eksperimenti su ponavljani triputa, a da bi se došlo do srednjih vrednosti. Na slici 1. su prikazani karakteristični zakoni promene sile izvlačenja u funkciji hoda izvlakača, a za razl-

ičite uslove izvlačenja prema usvojenom planu eksperimenta.



Slika 1.

2.1. Izbor uticajnih faktora

Analizirajući proces dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine zida, na osnovama teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, može se zaključiti da na silu izvlačenja utiče veliki broj faktora, od kojih su najznačajniji:

- vrsta materijala predmeta obrade, odnosno oblik zakona ojačavanja: $k = k(\varphi)$;
- uglovi prstenova za izvlačenje (α_1, α_2, ...);
- logaritamski stepen deformacije: $\varphi = \ln(A_0/A_1)$;
- visina zone glačanja (l);
- debljina dna pripremka (s_0);
- brzina deformisanja (v_0) i
- koeficijent trenja (μ).

U cilju iznalaženja matematičkog modela za silu izvlačenja, a koji uzima u obzir koeficijent trenja (μ_2), izvršeno je planiranje eksperimenta sa dva nivoa variranja uticajnih parametara.

Izabrani uticajni parametri su:

- logaritamski stepen deformacije (φ),
- odnos prečnika prvog i drugog prstena za izvlačenje (d_1/d_2) i
- koeficijent trenja (μ_2).

Ostali uticajni faktori su imali sledeće vrednosti, i to:

- uglovi prvog i drugog prstena za izvlačenje: $\alpha_1 = \alpha_2 = 12°$;
- visina zone glačanja: $\ell_1 = \ell_2 = 3$ mm,
- debljina dna pripremka: $s_0 = 7$ mm i
- brzina deformisanja: $v_0 = 0{,}002$ m/sec.

Izbor intervala varijacije izabranih parametara (tabela 2.), izvršen je na osnovi analize najčešće primenjivanih slučajeva u praksi, osim za koeficijent trenja (μ_2), gde je za gornji nivo procenjena vrednost koeficijenta trenja na osnovi literaturnih podataka [6], za slučaj suvog trenja, za dati materijal i uslove izvlačenja.

2.2. Postavljanje matematičkog modela

Za matematički model je usvojen polinom u obliku:

$$y = b_o + \sum_{i=1}^{i=k} b_i \cdot x_i + \sum_{i<j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \qquad (1.)$$

gde su: - b_o, b_i i b_{ij} - koeficijenti regresije koji se mogu dobiti korišćenjem rezultata eksperimenta.

Za tri izabrana uticajna faktora i potpuni faktorni plan eksperimenta dvonivojskog tipa, potrebno je izvesti: $N = 2^3 = 8$ nezavisnih opita.

Da bi se omogućila izrada ortogonalne plan matrice eksperimenta, neophodno je izvršiti kodiranje, odnosno prevodjenje prirodnih vrednosti izabranih faktora u neimenovane veličine.

Veza izmedju prvobitnih i kodiranih faktora data je izrazom:

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{w_i}, \quad i = 1, 2, 3, \ldots, k \tag{2}$$

gde su: X_i - prirodna vrednost i-tog faktora;
X_{oi} - vrednost i-tog faktora na nultom nivou;
w_i - interval varijacije i-tog faktora i
x_i - kodirane koordinate.

Za usvojeni broj uticajnih faktora, matematički model (1) poprima oblik:

$$y = b_o + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \tag{3}$$

gde su koeficijenti regresije:

$$b_o = \frac{\sum_{u=1}^{u=N} \bar{y}_u}{N}$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{u=N} X_{iu} \cdot \bar{y}_u}{N} \quad i = 1, 2, 3, \ldots, k$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{u=N} X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot \bar{y}_u}{N} \quad i \; j = 1, 2, 3, \ldots, k \tag{4}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{u=N} X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot X_{u} \cdot \bar{y}_u}{N} \quad i \; j \; k = 1, 2, 3, \ldots, k.$$

Na osnovi usvojenog plana eksperimenta, izvršena su snimanja deformacione sile izvlačenja, čiji su rezultati dati u tabeli 2.

Vrednosti koeficijenta regresije, izračunate pomoću obrasca (4) iznose:

$b_o = 33,5$; $b_1 = 7,54$; $b_2 = -1,91$; $b_3 = 1,14$; $b_{12} = 0,79$;

$b_{13} = 0,63$; $b_{23} = 0,19$ i $b_{123} = 0,34$.

2.3. Provera značajnosti koeficijenta regresije

Za usvojeni sistem ponavljanja eksperimenta u svim tačkama višefaktornog ortogonalnog plana, disperzija eksperimenta računa se po izrazu:

$$S^2_{(y)} = S^2_E = \frac{\sum_{u=1}^{u=N} \sum_{j=1}^{j=m} (y_{uj} - \bar{y}_u)^2}{f_E} \qquad (5)$$

gde je: $f_E = N.(m - 1) = 8.(3 - 1) = 16$ - broj stepeni slobode, a disperzija parametara modela po izrazu:

$$S^2_{(bi)} = \frac{S^2_{(y)}}{N.n} = \frac{S^2_E}{N.n} \qquad (6)$$

Prema t-kriterijumu računske vrednosti se odredjuju pomoću izraza:

$$t_{ri} = \frac{|b_i|}{S_{(bi)}} \qquad (7)$$

Koristeći izračunate vrednosti, date u tabeli 2., dobiju se sledeće vrednosti za:

$$S^2_{(y)} = \frac{10,73}{16} = 0,67$$

$$S^2_{(bi)} = \frac{0,67}{8.3} = 0,0279$$

$$S_{(bi)} = \sqrt{0,0279} = 0,167$$

$t_{ro} = 200,5$; $t_{r1} = 45,1$; $t_{r2} = 11,43$; $t_{r3} = 6,82$; $t_{r12} = 4,73$; $t_{r13} = 3,77$; $t_{r23} = 1,13$ i $t_{r123} = 2,02$.

Za broj stepeni slobode $f_E = 16$, i usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 5\ \%$, tablična vrednost iznosi $t_t = 1,75$, pa prema uslovnoj z-

Tabela 1.2

Tačke plana	Plan-matrica								Eksperimentalni rezultati				Provjera modela		
	x_o	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_i$	s_i^2	$\hat{y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	43,2	42	41,4	42,2	1,68	42,o3	o,oo3
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	23,4	24	23,4	23,6	o,24	23,43	o,o2
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	42	45	43,2	43,4	4,56	43,59	o,o3
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	29	3o	28,2	29,3	o,83	29,51	o,o4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	36,6	39	37,2	37,6	3,12	37,81	o,o4
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	23	22,8	22,8	22,9	o,o3	23,o9	o,o36
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	4o,8	41	4o,8	4o,9	o,o3	4o,73	o,o3
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	28,2	27,6	28,2	28	o,24	27,81	o,o36
Osnovni nivo		o,75	1,036	o,15								33,5	1o,73		o,2421
Varij.		o,15	o,o18	o,o5											
Gornji nivo		o,9	1,054	o,2											
Donji nivo		o,6	1,018	o,1											

$$x_1 = \frac{\varphi - o,75}{o,15} \qquad x_2 = \frac{d_1/d_2 - 1,o36}{o,o18} \qquad x_3 = \frac{\varkappa_2 - o,15}{o,o5}$$

načajnosti $t_{ri} > t_t$, sledi da su parametri: b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13} i b_{123} značajni, dok je parametar b_{23} nesignifikantan.

Parametar b_{23} se može isključiti iz modela, bez korekcije vrednosti značajnih parametara, tako da matematički model (3) glasi:

$$y = 33,5 + 7,54 \cdot x_1 - 1,191 \cdot x_2 + 1,14 \cdot x_3 + 0,79 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,63 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,34 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \qquad (8)$$

2.4. Provera adekvatnosti modela

Matematički model se, prema Fišerovom kriterijumu, smatra adekvatnim, ako je ispunjena nejednakost [4]:

$$F_r = \frac{S^2_{LF}}{S^2_E} \leq F(\alpha, f_{LF}, f_E) \qquad (9)$$

gde su:

$S^2_{LF} = \dfrac{m \cdot \sum (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{f_{LF}}$ - disperzija adekvatnosti;

$S^2_E = S^2_{(y)}$ - disperzija eksperimenta;

$F(\alpha, f_{LF}, f_E)$ - tablična vrednost kriterijuma Fišera;

$f_{LF} = N_o - (k + 1) - N.(m - 1)$ - broj stepeni slobode disperzije adekvatnosti;

f_E - broj stepeni slobode disperzije eksperimenta i

$\hat{y}_u$ - računska vrednost funkcije cilja na u-toj seriji opita.

Koristeći podatke date u tabeli 2., i izraze (5), (9) i (10), računska vrednost $F_r = 0,27$, a tablična $F(0,05, 4, 16) = 3,0$, što zadovoljava izraz (9). To znači da usvojeni matematički model na adekvatan način opisuje dotični proces.

Zamenom kodiranih faktora u izrazu (8) sa prirodnim vrednostima, pomoću jednačina transformacije (2) tabela 2., dobija se konačni izraz za proračun deformacione sile dubokog izvlačenja sa

redukcijom debljine zida u obliku:

$$F = 45{,}71 + 126.\varphi - 42{,}2.(d_1/d_2) + 1916{,}6.\mu_2 - 85{,}2.\varphi.(d_1/d_2) - 2525.\varphi.\mu_2 - 1888{,}9.(d_1/d_2).\mu_2 + 2518{,}5.\varphi.(d_1/d_2).\mu_2 \quad KN \qquad (11)$$

Dobijeni izraz za izračunavanje deformacione sile izvlačenja potvrdjuje teorijske analize date u 2 , po kojoj koeficijent trenja na kontaktnoj površini izmedju izvlakača i obratka povećava silu izvlačenja, a smanjuje napon izvlačenja.

3. ZAKLJUČAK

Na osnovi sprovedenih eksperimenata mogu se izvući sledeći zaključci, i to:

1. Sa povećanjem koeficijenta trenja izmedju izvlakača i obratka, dolazi do povećanja deformacione sile izvlačenja, čime su potvrdjene teorijske postavke u radu [2] .
2. Dobijeni matematički model za proračun sile izvlačenja verno opisuje proces u posmatranom intervalu izabranih uticajnih faktora.
3. Razvijeni matematički model se može lako proširiti na ostale uticajne parametre, pa je moguće dobiti zavisnost sile izvlačenja od većeg broja uticajnih parametara.

L i t e r a t u r a:

[1] ŠOFMAN L.A.: Teorija i rasčeti procesov holodnoj štampovki, Mašinostroenie, Moskva, 1977.

[2] POPOVIĆ P., DJUKIĆ H.: Prilog rasmatranju uticaja trenja na kontaktnoj površini izvlakača i obratka na deformacionu silu i naponsko stanje u materijalu.

[3] ČINČENEV N.A.: Metodi isledovanija procesov metalov davleniem Metalurgija, Moskva, 1977.

[4] STANIĆ J.: Metodi inženjerskih merenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1975.

[5] POPOV E.A.: Osnovi teoriji listovoj štampovki, Mašinostroenie, Moskva, 1977.

[6] ISAČENKOV E.I.: Kontaktnoe trenie i smazki pri obrabotki metalov davleniem, Mašinostroenie, Moskva, 1978.

[7] ZEC M.: Statistička matematika, Univerzitet, Sarajevo, 1977.

Djukić H., Popović P.

NEKI REZULTATI ISTRAŽIVANJA UTICAJA TRENJA NA KONTAKTNOJ POVRŠINI IZVLAKAČA I OBRATKA NA PROCES DUBOKOG IZVLAČENJA SA REDUKCIJOM DEBLJINE ZIDA

R e z i m e

U radu se daju rezultati eksperimentalnih istraživanja i ispitivanja kontaktnog trenja izvlakač-obradak na deformacionu silu. Eksperimenti su sprovedeni korišćenjem metoda planiranja eksperimenta, i dobijeni rezultati potvrdjuju teorijske postavke autora iznete u njihovim ranijim istraživanjima.

GEWISSE VERSUCHSERGEBNISSE DES REIBUNGSEINFLUSSES AUF DER KONTAKTELACHE DES AUSWERFERS UND VERK STUCKES AUF DAS TIEFZIEHVERFAHREN MIT DER WANDSTARKENREDUKTION

Z u s a m m e n f a s s u n g

In der Arbeit werden experimentale Versuchs-und Prüfergenisse der Kontaktreibung Auswerfer-Werkstück auf die Verformungskraft gegeben. Die Versuche sind durch die Verwendung der Experimentplanierungsmethode ausgeführt, und die ermittelten Ergebnisse bestätigen die, in ihren frühenen Untersuchungen gegebenen theroterischen Behauptungen der Autoren.

UTICAJ DODATKA NEMETALNE FAZE Al_2O_3 NA PONAŠANJE ALATNOG ČELIKA Fe-Cr12Mo4,8 PRI DEFORMISANJU I TERMIČKOJ OBRADI

Mr DUŠANKA VUKIĆEVIĆ, asistent Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Dr DIMITRIJE STEFANOVIĆ, docent Elektronskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

1. UVOD

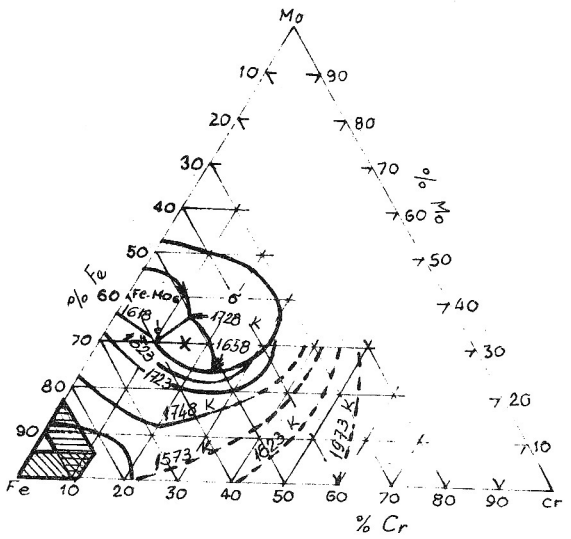
U savremenoj mašinogradnji, a naročito u procesima obrade deformisanjem, postavljaju se svakim danom sve oštriji zahtevi u pogledu kvaliteta alata. Uslovi njihove eksploatacije se stalno modifikuju u pravcu izraženog povećanja mehaničkih i termičkih opterećenja, pa se s toga permanentno čine napori u pravcu iznalaženja metoda i postupaka dobijanja kvalitetnijih alatnih materijala u odnosu na postojeće.

Uključujući se u opšte napore, i polazeći od poznatih metoda disperznog ojačavanja čistih metala [1, 2], kao i najnovijih saznanja disperznog ojačavanja dvokomponentnih legura [3, 4], te naročito čelika na bazi hroma i nikla [5] - a obzirom na istraživanja metoda projektovanja, proračuna i izrade alata za obradu materijala deformisanjem na Mašinskom fakultetu u Nišu - poklonjena je posebna pažnja ovim metodama povećavanja osobina meterijala,

pa se u ovom radu daju neki rezultati naših istraživanja u tom pravcu.

2. EKSPERIMENTALNI RAD

Praćenjem procesa konsolidacije sistema Fe-Cr12-Mo, sa sadržajima od 0 ÷ 4,8 % Mo [x], šrafirano područje trokomponentnog dijagrama Fe-Cr-Mo (Slika 1.), odlučili smo da ojačavamo leguru Fe-Cr12-Mo4,8, odnosno da na njoj pratimo uticaj dodatka nemetalne faze Al_2O_3. Razlozi za ovakvu odluku su sledeći:



Slika 1.

1. Mikrostrukturnom analizom sinterovanih uzoraka utvrdili smo da se za ovaj sastav najpotpunije odigrava reakcija izmedju čestica Fe, Cr i Mo tokom sinterovanja. Pri tome se stvaraju dvojni čvrsti rastvori Fe-Cr i Fe-Mo, i manje količine trojnog sastava Fe-Cr-Mo. Sve prisutne faze su veoma homogeno rasporedjene u masi Fe.
2. Odabiranjem legure sa sadržajem od 4,8 % Mo izbegli smo uticaj intermetalne σ - faze, koja je veoma tvrda i krta,

---

x) Procenti dati u težinskim odnosima.

i koja se javlja pri nižim sadržajima molibdena (prema rentgenskoj analizi naših uzoraka).

3. U našim ranijim ispitivanjima [6] došli smo do rezultata da legura Fe-Cr12-Mo4,8 ima veću vrednost mikrotvrdoće od svih ostalih ispitivanih legura sistema Fe-Cr-Mo, najmanju gustinu i najmanje vrednosti termoelektrootporne sile (TEMS). Pri tome su ispitivane legure sadržale 0÷4,8 % molibdena.

Uzorci, osnovne (Fe-Cr12-Mo4,8) i ojačane (Fe-Cr12-Mo4,8-5% Al_2O_3) legure, dimenzija $\varnothing$ $8x6^{\pm 0,1}$ mm, dobijeni su presovanjem praha pod pritiskom od 3.10^8 Pa u čeličnom kalupu. Svi korišćeni prahovi (Fe, Cr, Mo i Al_2O_3) su bili čistoće 99,9 %, karakteristika datih u tabeli I.

Tabela I

Materijal	Veličina čestica u m	Oblik čestica
Fe	2.10^{-4}	Nepravilan, teži zaobljenju
Cr	3.10^{-4}	Nepravilan, oštrih ivica, bezporozan
Mo	10^{-5}	Zaobljen
Al_2O_3	10^{-5}	Izdužen

Ispreske osnovne i ojačane legure smo sinterovali u protočnoj atmosferi vodonika na temperaturi 1623 K u trajanju od 180 minuta.

Nakon sinterovanja odredjivali smo mehaničke karakteristike uzoraka merenjem mikrotvrdoće, čije su vrednosti date u tabeli II.

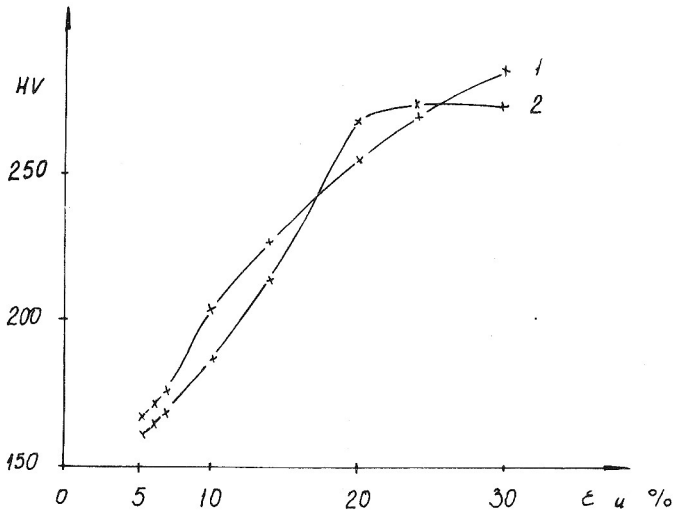
Tabela II

Legura	Mikrotvrdoća $HV_{0,05}$
Fe-Cr12-Mo4,8	160
Fe-Cr12-Mo4,8-5%Al_2O_3	156

Posle merenja mikrotvrdoće uzorke osnovne i ojačane legure deformisali smo sabijanjem po visini različitim stepenima deformacije ($\epsilon = 5 \div 30$ %).

Mehaničke karakteristike deformisanih uzoraka, takodje smo

pratili preko promena mikrotvrdoće (tabele III i IV).Zavisnost mikr otvrdoće od stepena deformacije za ispitivane legure prikazana je grafički na sl. 2, gde je pod 1-legura Fe-Cr12-Mo4,8 i pod 2-legura Fe-Cr12-Mo4,8-5%Al_2O_3.



Slika 2.

Tabela III

ε u %	Mikrotvrdoća $HV_{0,05}$		
	Deformisano	Žareno na temperaturi u K	
		573	1073
5	165	160	152
6	170	164	160
7	178	170	165
10	204	199	180
20	252	223	147
24	266	219	130
30	280	210	120

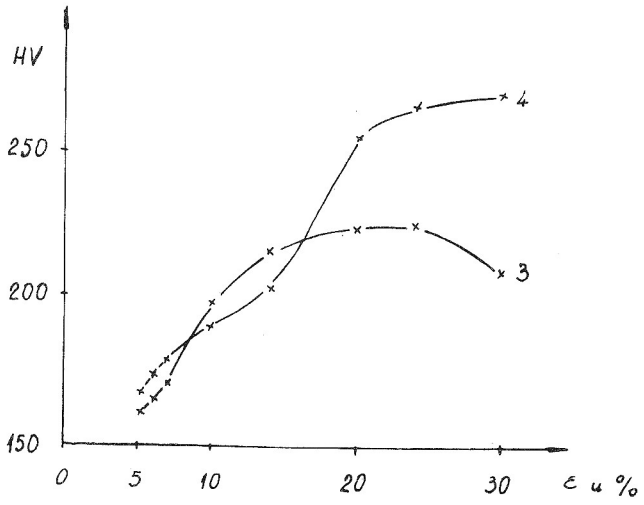
U tabeli III date su vrednosti mikrotvrdoća deformisane i

žarene legure Fe-Cr12-Mo4,8, a u tabeli IV legure Fe-Cr12-Mo4,8-5%Al_2O_3.

Tabela IV

u %	Mikrotvrdoća $HV_{0,05}$		
	Deformisano	Žareno na temperaturi u K	
		573	1073
5	159	165	162
6	163	172	169
7	168	179	173
10	185	190	187
20	263	253	257
24	270	265	258
30	272	268	256

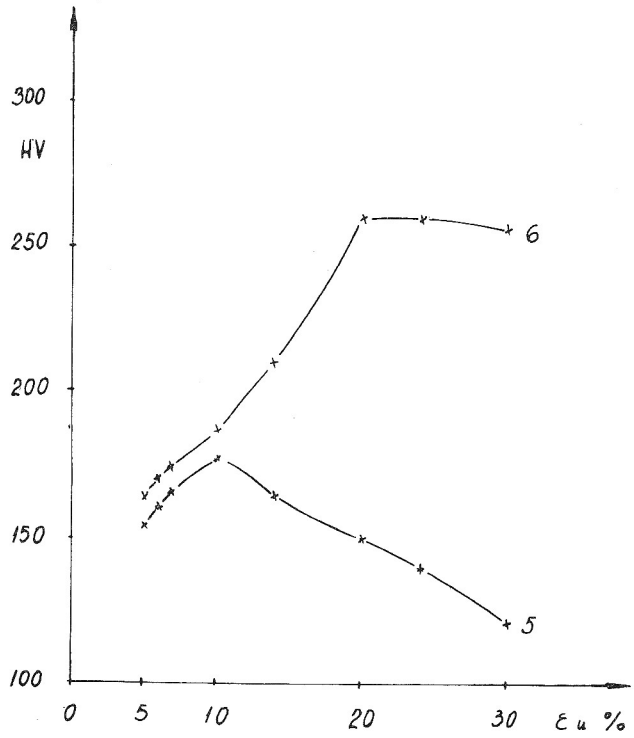
Kod uzoraka osnovne legure (kriva 1 na sl. 2) mikrotvrdoća raste skoro linearno sa porastom stepena deformacije.



Slika 3.

Kod uzoraka ojačane legure (kriva 2 na sl. 2) mikrotvrdoća raste skoro linearno do stepena deformacije ε = 20 %. Za veće stepene deformacije pojavljuje se efekat zasićenja; mikrotvrdoća sporije raste (za ε = 20 ÷ 30 %).

Deformisane uzorke osnovne i ojačane legure smo zatim žarili na temperaturi 573 K i 1073 K, i pri tome pratili promene mikrotvrdoće (tabele III i IV).



Slika 4.

Zavisnosti mikrotvrdoće od deformacije izmerene posle žarenja, grafički su prikazane na slici 3 za temperaturu 573 K, odnosno na slici 4 za temperaturu 1073 K. Na ovim slikama krive 3 i 5 odgovaraju osnovnoj leguri, a krive 4 i 6 ojačanoj leguri.

3. DISKUSIJA REZULTATA

Poredjenjem krivih 1 i 2 na slici 2 zapaža se sledeće:

- Kod materijala koji je ojačan sa 5 % Al_2O_3 je manji porast

mikrotvrdoće sa porastom stepena deformacije do ε = 17 % u odnosu na osnovnu leguru.

- Mada se mikrotvrdoća osnovne i ojačane legure, izmerene na nedefinisanim uzorcima neznatno razlikuje (Tabela II) sa porastom deformacije, ta razlika se povećava, i najveća je pri ε = 10 %.
- Mikrotvrdoća je veća za uzorke osnovne legure nego za uzorke ojačane legure pri deformacijama od ε = 5% do ε = = 17 %.
- Sa porastom stepena deformacije od ε = 17 % do ε = 25,5% mikrotvrdoća ojačane legure je veća od mikrotvrdoće osnovne legure, i ta razlika je najveća kod ε = 20 % (slika 2).
- Može se videti da ako materijali osnovne i ojačane legure se deformišu sa deformacijom ε = 17,5 % i ε = 25,5 % imaće iste vrednosti mikrotvrdoće (kriva 1 i 2 se seku).
- Za deformacije ε = 5 ÷ 17,5 %, mikrotvrdoća ojačane legure raste sa porastom stepena deformacije i ima manje vrednosti od mikrotvrdoće osnovne legure.
- Za deformacije ε = 25,5 ÷ 30 %, mikrotvrdoća ojačane legure je manja od mikrotvrdoće osnovne legure i brže opada.

Analizom krivih na slici 3 zapaža se:

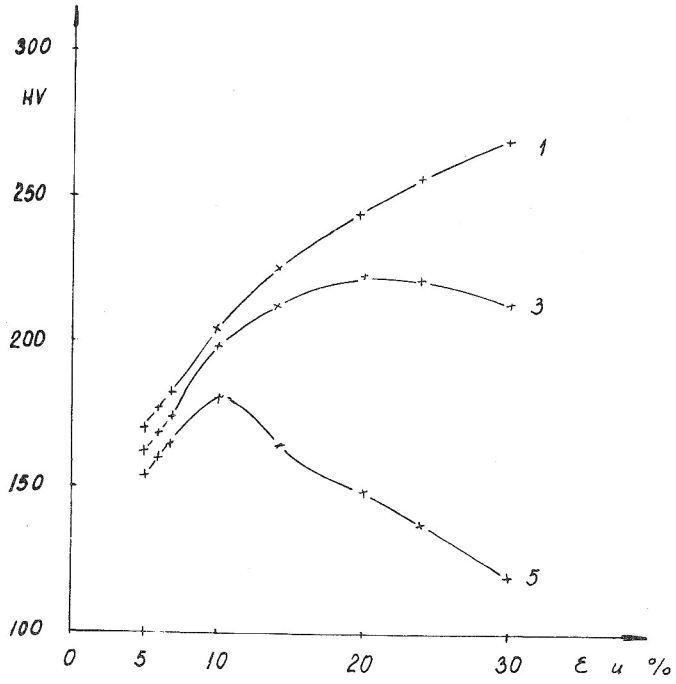
- Mikrotvrdoća ojačane legure koja je žarena na 573 K raste sa porastom stepena deformacije od ε = 5 % do ε = 8,8 %, i ima veće vrednosti nego kod osnovne legure pri istim uslovima.
- Pri deformaciji od ε = 8,8% do ε = 16,8 % ojačana legura ima manje vrednosti mikrotvrdoće u odnosu na osnovnu leguru.
- Za stepen deformacije veći od ε = 16,8 % mikrotvrdoća ojačane legure se veoma malo menja u odnosu na deformisane nežarene uzorke iste legure, tako da njene vrednosti leže daleko iznad vrednosti za mikrotvrdoće osnovne legure.

Analizom krivih na slici 4 zapaža se:

- Neznatno smanjenje mikrotvrdoće kod uzoraka žarenih na 1073 K (kriva 6) u odnosu na nežarene uzorke (Kriva 2 na slici 2).
- Istovremeno iz položaja krive 5 na istoj sl. 4 se zapaža

da kod osnovne legure već pri deformaciji od ε = 10 % dolazi do pada mikrotvrdoće u odnosu na nežarene uzorke (kriva 1 na sl. 2), i sa daljim porastom deformacije mikrotvrdoća sve više opada, tako da već pri deformaciji od ε = = 30 % iznosi $HV_{0,05}$ = 12o, što je manje nego kod nedeformisane legure.

Na slici 5 prikazana je grafička zavisnost mikrotvrdoće osnovne legure od stepena deformacije, i to: kriva 1 - deformisano stanje, kriva 3 - žareno na 573 K i kriva 5 - žareno na 1073 K.

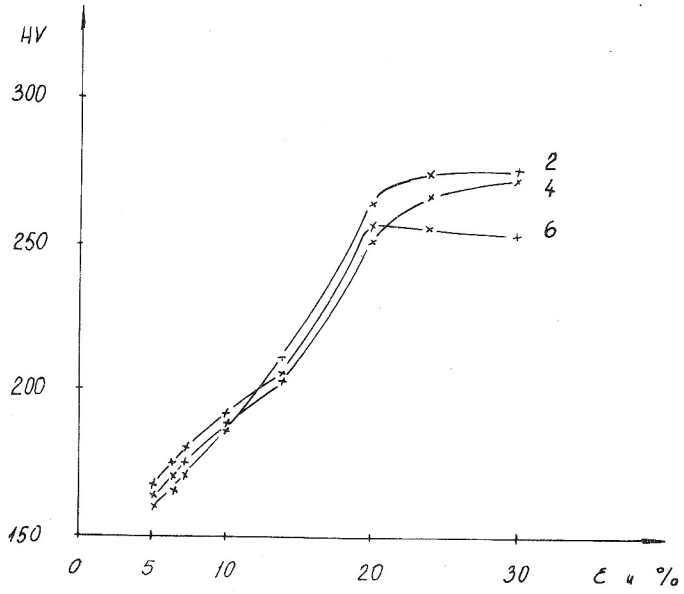


Slika 5.

Iz položaja krivih na slici 5 se zapaža da porast temperature žarenja smanjuje mikrotvrdoću legure Fe-Cr12-Mo4,8, što ukazuje da se osnovnom materijalu posle žarenja vraćaju plastična svojstva tako da se može naknadno deformisati.

Na slici 6 prikazana je grafička zavisnost mikrotvrdoće oja-

čane legure od stepena deformacije, i to: kriva 2 - deformisano stanje, kriva 4 - žareno na 573 K i kriva 6 - žareno na 1073 K.



Slika 6.

Iz položaja krivih na dijagramu prikazanom na slici 6 zapaža se da:

- Mikrotvrdoća odžarene ojačane legure raste sa porastom stepena deformacije, i do ε = 11 % ima veće vrednosti od mikrotvrdoće iste nežarene legure (kriva 2)(najveće vrednosti ima pri žarenju na 573 K - kriva 4, a zatim nešto niže za 1073 K - kriva 6).
- Približno iste vrednosti mikrotvrdoće se dobijaju pri stepenima deformacije ε = 10 ÷ 11,5 % za sva tri stanja ojačane legure.
- Pri deformacijama ε = 11,8 ÷ 20 % neznatno je smanjena mikrotvrdoća ojačane legure u odnosu na nežarenu leguru; zapaža se da pri nižoj temperaturi žarenja od 573 K nastaje veće smanjenje mikrotvrdoće (kriva 4), dok se veće vrednosti dobijaju pri žarenju na 1073 K (kriva 6).
- Pri deformacijama ε = 20 ÷ 30 % najmanje vrednosti mikrotvrdoće se dobijaju pri žarenju na 573 K, dok su pri

žarenju na 1073 K neznatno manje u odnosu na neodžareno stanje iste ojačane legure.

Na osnovu rasmatranja krivih promene mikrotvrdoće od deformacije ojačane legure (krive 2, 4 i 6 na slici 6) može se zapaziti da legura Fe-Cr12-Mo4,8-5%Al_2O_3 pri žarenju na 573 K i 1073K ne menja svoje osobine, što znači da je istoj nemoguće žarenjem vratiti njene plastične karakteristike.

4. ZAKLJUČAK

Analizom dobijenih rezultata došli smo do sledećih zaključaka:

1. Disperznim ojačanjem osnovne legure bitno se utiče na izmenu zakona promene ojačavanja materijala.
2. U domenu relativno malih deformacija ($\varepsilon = 0 \div 20$ %) intenzitet ojačavanja je veći za ojačane legure, da bi pri daljem deformisanju ojačavanje materijala postalo neznatno.
3. Porast temperature žarenja utiče na smanjenje mikrotvrdoće osnovne legure, i to utoliko više ukoliko je veća temperatura žarenja i veći stepen deformacije.
4. Porast temperature žarenja neznatno smanjuje mikrotvrdoće ojačane legure; smanjenje opada sa porastom temperature žarenja. Pri deformaciji $\varepsilon = 11$ % sa porastom temperature žarenja dolazi do porasta mikrotvrdoće materijala iznad vrednosti koje legura ima za nežareno stanje.

Iz prve dve konstatacije proizlazi da se disperznim ojačanjem, tj. dodatkom nemetalne faze Al_2O_3 u leguru tipa Fe-Cr12-Mo4,8 dobija legura povećane čvrstoće i poboljšanih plastičnih osobina. To je od velikog interesa za alate koji se izradjuju deformisanjem (utiskivanjem, istiskivanjem, i sl.).

Iz trećeg i četvrtog zaključka proizlazi da se kod disperno ojačane legure (Fe-Cr12-Mo4,8-5%Al_2O_3) žarenjem ne menja mikrotvrdoća, i da se žarenjem na 573 K i 1073 K ne poboljšavaju plastične osobine, ali se zadržavaju već postignute.

Na osnovi ovih ispitivanja može se zaključiti da je ovaj materijal veoma podesan za izradu alata koji se koriste za obradu na toplo (kovački i sl.).

L i t e r a t u r a:

1 ANCIFEROV V.N.,VAGANOV A.N.: Voloknistie i dispersnoupročnennie kompozicionnie materiali,"Mir", Moskva, 1976, 193-196.

2 BORISENKO V.A.,KRAŠČENKO V.P.,MOISEEV V.P.,TREFILOV V.I.: Ukr. fiz. žurnal, 22, 43-48, 1977.

3 BROWN L.M.: Deformation of two phase alloys, Mater. Sci and Eng., 25, 181-185, 1976.

4 V.I.TREFILOV, V.F.MOISEEV: Dispersnie častici v tugoplavkih metallah, Kiev, "Naukova dumka",1978.

5 A.KELLI: Visokopročnie materiali, "Mir", Moskva, 1976.

6 Projekat: Istraživanje i razvijanje metoda projektovanja i proračuna savremenih sredstava i metoda obrade materijala deformisanjem sa ispitivanjem obradivosti domaćih materijala zaključno do verifikacije, Mašinski fakultet, Niš, 1976-1980.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DES ZUSCHLAGES DER NICHTMETALLPHASE Al_2O_3 AUF DAS VERHALTEN DES WERKZEUGSTAHLES Fe-Cr12-Mo4,8 BEI DER VERFORMUNG MUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG

In der Arbeit sind durch die experimentellen Versuche und Prüfungen erworbenen Ergebnisse zur Gewinnung eines qualitativ besseren Werkzeugstahles Typ Fe-Cr12-Mo durch die Methode der Dispersionsverstärkung mit dem Zuschlag der Nichtmetallphase Al_2O_3 gegeben.

Die Untersuchungem zeigen, dass durch dieses Verfahren das Gewinnen des Werkzeugstahles möglich ist, der bei den erhöheten Temperaturen seine mechanischen Eigenschaften nicht ändert was günstig für die Fertigung der Schmiedewerkzeuge ist.

PRILOG RAZMATRANJU TEORIJE SLIČNOSTI U PROCESIMA PLASTIČNOG OBLIKOVANJA

Mr Miljenko Math, asistent
Fakulteta strojarstva i
brodogradnje Sveučilišta
u Zagrebu

1. Razrada problema

Osnovu za računsko rješavanje problema preoblikovanja daje teorija plastičnosti. Služeći se fizikalnim veličinama neovisnim od bilo kojeg pojedinačnog koordinatnog sistema koji može biti upotrebljen za njihovo opisivanje, te su veličine matematički predstavljene pomoću tenzora. Oni su ovdje prikazani u skraćenom indeksno pisanom obliku i i j za Kartezijev koordinatni sistem. Tako na pr. devet komponenti tenzora naprezanja napisanih u obliku simetrične matrice odredjuju tenzor naprezanja σ_{ij} koji je u skraćenom obliku prikazan kao

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \qquad /1/$$

Na sličan način se piše:

- vektor brzina v_i
- devijator napregnutog stanja s_{ij}
- devijator brzine napregnutog stanja $\dot{s}_{ij}$
- tenzor deformacija ε_{ij}
- tenzor brzine deformacija $\dot{\varepsilon}_{ij}$
- devijator deformacija e_{ij}
- devijator brzine deformacija $\dot{e}_{ij}$

Sistem osnovnih jednadžbi teorije plastičnosti sastoji se od tri uvjeta ravnoteže, koji odgovaraju trima pravcima prostora

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0 \qquad /2/$$

Uvjet plastičnog tečenja prema R.v. Mises-u glasi

$$s_{ij}s_{ij} = \frac{2}{3} k_f^2 \qquad /3/$$

gdje je sa k_f označeno naprezanje plastičnog oblikovanja. Šest jednadžbi zakona tečenja Levy-Mises-a glase

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda_p s_{ij} \qquad /4/$$

Faktor proporcionalnosti λ_p (indeks p je upotrebljen da ne dodje do zamjene sa kasnije uvedenim pojmom odnosa dužine λ) može se odrediti iz slijedećeg računa kvadraturom i sumiranjem jednadžbe /4/ uzimajući u obzir jednadžbu /3/

$$\lambda_p = \frac{1}{k_f} \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \qquad /5/$$

Šest brzina deformacija $\dot{\varepsilon}_{ij}$ u jednadžbi /4/ sastoje se od tri brzine v_i reducirane na

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \qquad /6/$$

Deset osnovnih jednadžbi /2/, /3/ i /4/ sastoje se na taj način od deset nepoznanica, šest funkcija σ_{ij}, tri funkcije v_i i funkcije λ_p. Na taj se način rješenje zadatka sastoji u pronalaženju funkcija gibanja i raspodjele naprezanja koje zadovoljavaju navedene jednadžbe. Pri praktičnom rješavanju ovog sistema jednadžbi, unatoč tome što broj nepoznanica odgovara broju jednadžbi susrećemo se sa brojnim poteškoćama, tako da analitičkog rješenja točnih

diferencijalnih jednadžbi u uvjetima realnog tehnološkog procesa nema, a u općem slučaju nije moguće računski opisati utjecaj materijala.

Radi toga se u primjenjenoj teoriji plastičnosti uvode pretpostavke i pojednostavljenja postavljanjem približnih diferencijalnih jednadžbi. Time se omogućava zaobilaženje poteškoća matematičke prirode i daje dovoljno dobra aproksimacija kvantitativno odredjenih zbivanja u procesu preoblikovanja. Kod tog načina rješavanja dobiveni rezultati imaju medjutim odredjena ograničenja.

Ako je predvidjanje ponašanja materijala na potpuno teoretskim osnovama otežano ili nemoguće, može biti od interesa u odredjenim slučajevima ispitivanje na smanjenom modelu. To je naročito značajno ako je razmatrani predmet velikih dimenzija i skup i kada je bilo kakova odluka o njegovoj konstrukciji i obliku zapravo konačna. Isto tako u mnogim slučajevima kod strukture u prirodnoj veličini koja je u upotrebi može biti otežano ispitivanje, a uz to je iscrpno istraživanje na pogonskim uredjajima za masovnu proizvodnju teško provedivo ili povezano sa visokom cijenom. Na taj način jedan od najjačih razloga za primjenu teorije sličnosti i modelnog ispitivanja može biti ekonomičnost. Ovdje je prezentiran pregled osnovnih zakona teorije sličnosti koji za tehniku oblikovanja metala deformiranjem dolaze u obzir kao i neki uvjeti i ograničenja koja se pri tom postavljaju pred istraživača.

Teoretske osnove teorije sličnosti leže u dimenzionalnoj analizi. Ova metoda omogućava dobivanje informacija o obliku zavisnosti medju veličinama u fizikalnim sistemima i iznalaženje uvjeta fizičke sličnosti medju zbivanjima, pa time i zakona modeliranja. Ovakovim postupkom se fizikalni odnosi izmedju dimenzionalnih veličina izražavaju kao funkcije bezdimenzionalnih parametara poznatih pod nazivom "kriterija sličnosti". Ovi kriteriji moraju zadovoljavati numeričke jednakosti odgovarajućih kombinacija svih parametara i modelnog procesa i onog stvarnog.

Kao osnovni odnosi izabrani su za odnos dužina veličina λ, za odnos sila κ, i za odnos vremena veličina τ.
To je definirano pomoću slijedeće jednadžbe

$$x_i=\lambda\bar{x}_i; \quad F_i=\kappa\bar{F}_i; \quad t=\tau\bar{t} \qquad /7/$$

pri čemu se veličine sa povlakom odnose na model, a one bez povlake

na mjerilo tehničke izvedbe u prirodnim uvjetima.

2. Pregled osnovnih zakona teorije sličnosti

Plastostatička sličnost izratka - jednadžbe /2/, /3/ i /4/ uzete u obzir sa jednadžbom /7/ glase za mjerilo tehničke izvedbe

$$\sigma_{ij} = \frac{\kappa}{\lambda^2} \cdot \bar{\sigma}_{ij} \quad ; \quad s_{ij} = \frac{\kappa}{\lambda^2} \cdot \bar{s}_{ij} \quad ; \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{\tau} \cdot \bar{\dot{\varepsilon}}_{ij} \qquad /8/$$

iz jednadžbi /5/ i /8/ slijedi proračunavanje faktora

$$\lambda_p = \frac{\bar{k}_f}{k_f} \cdot \frac{1}{\tau} \, \bar{\lambda}_p \qquad /9/$$

Jednadžba uvjeta plastičnog tečenja /3/ sa jednadžbom /8/ daje

$$\kappa = \frac{k_f}{\bar{k}_f} \lambda^2 \qquad /10/$$

U teoriji sličnosti i modelnom ispitivanju uobičajeno je da u jednadžbama stoje bezdimenzionalne veličine, pa se jednadžba /10/ može pisati u obliku

$$K_1 = \frac{F}{k_f A} \qquad /11/$$

gdje je sa F označena sila a sa A površina i taj izraz predstavlja bezdimenzionalnu veličinu za plastostatičku sličnost. U slučaju da je $\bar{k}_f = k_f$ što odgovara deformaciji istog materijala za model i strukturu u prirodnim uvjetima slijedi da je

$$\bar{p} = p \qquad /12/$$

gdje su $\bar{p}$ i p odgovarajući specifični pritisci. Time slijedi

$$F = \bar{F}\lambda^2 \qquad /13/$$

U slučaju rada ovo znači da je

$$W = \bar{W}\lambda^3 \qquad /14/$$

odnosno

$$\bar{a} = a \qquad /15/$$

gdje su $\bar{a}$ i a odgovarajući specifični radovi deformacija.

Plastostatička i elastostatička sličnost izratka - u slučaju kada je potrebno u obzir uzeti i elastična svojstva izratka, odnosi naprezanja i prirasta deformacija prema M.Levy-u i R.v.Mises-u zamjenjuju se jednadžbama L.Prandtl-a i A.Reuss-a.

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}^{el}_{ip} + \dot{e}^{pl}_{ij} = \frac{1}{2G}\,\dot{s}_{ij} + \lambda_p s_{ij} \qquad /16/$$

$$e^{el}_{ii} = \frac{1-2\nu}{E}\,s_{ii} = \left(\frac{3}{E} - \frac{1}{G}\right)s_{ii} \qquad /17/$$

U ovim je jednadžbama G modul klizanja, E modul elastičnosti i ν Poisson-ov koeficijent. Faktor proporcionalnosti λ_p proračunava se numerički iz

$$\lambda_p = \frac{1}{k_f}\sqrt{\frac{3}{2}\,\dot{e}^{pl}_{ij}\,\dot{e}^{pl}_{ij}} \qquad /18/$$

Iz ovoga slijedi odnos kod istovremenog ispunjavanja uvjeta plastostatičke i elastostatičke sličnosti izratka

$$\kappa = \frac{k_f}{\bar{k}_f}\,\lambda^2 = \frac{G}{\bar{G}}\,\lambda^2 = \frac{E}{\bar{E}}\,\lambda^2 \qquad /19/$$

Prijelazom na bezdimenzionalne numeričke veličine dobivaju se tzv. Hook-ovi kriteriji sličnosti

$$K_2 = Ho_{(G)} = \frac{F}{GA} \qquad /20/$$

$$K_3 = Ho_{(E)} = \frac{F}{EA} \qquad /21/$$

Dinamička sličnost izratka - ukoliko sila inercije igra ulogu kod materijala, uvjeti ravnoteže nisu više ispunjeni jednadžbom /2/ nego se mogu napisati u obliku slijedećeg izraza

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho\,\frac{dv_i}{dt} \qquad /22/$$

gdje je sa ρ označena gustoća materijala. Sa jednadžbama /7/ i /8/ i sa

$$v_i = \frac{\lambda}{\tau}\,\bar{v}_i \qquad /23/$$

slijedi da je

$$\kappa = \frac{\rho}{\bar{\rho}}\,\frac{\lambda^4}{\tau^2} \qquad /24/$$

Odgovarajući kriterij sličnosti poznat je kao Newton-ov karakterističan broj Ne

$$K_4 = Ne = \frac{Ft^2}{\rho A} = \frac{F}{\rho A v^2} \qquad /25/$$

Sličnost trenja - uobičajeno je smatrati da je naprezanje zbog trenja proporcionalno pritisku na površinu kako slijedi iz Coulomb-ovog zakona

$$\tau_t = \mu \cdot p \qquad /26/$$

gdje je sa μ označen koeficijent trenja. Treba li naprezanje izazvano trenjem biti isto to je

$$\mu = \bar{\mu} \qquad /27/$$

Termička sličnost - prostorno i vremensko temperaturno polje u unutrašnjosti materijala odredjeno je diferencijalnim jednadžbama prijelaza topline. Ako sa T označimo apsolutnu temperaturu, sa t vrijeme i x, y, z prostorne koordinate može se napisati slijedeći izraz

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad /28/$$

Konstanta materijala $\underline{a}$ je koeficijent temperaturne vodljivosti. Ukoliko sa λ_ω označimo koeficijent toplinske vodljivosti, sa $\underline{c}$ specifičnu toplinu i sa γ specifičnu težinu to je $a = \lambda_\omega / c\gamma$, pa uvodjenjem temperaturnog odnosa $\Theta = T/\bar{T}$ slijedi iz jednadžbe /28/ odnos vremena

$$\tau = \lambda^2 \frac{\bar{a}}{a} \qquad /29/$$

Napisano pomoću bezdimenzionalnih veličina dobivamo Fourier-ov broj

$$K_5 = Fo = \frac{A}{ta} \qquad /30/$$

U vremenskim jedinicama količina topline odane zračenjem je

$$\frac{dQ}{dt} = A_1 C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \qquad /31/$$

gdje je sa A_1 označena površina tijela koje zrači, sa T_1 apsolutna temperatura površine, sa T_2 apsolutna temperatura okoline i C_{12} koeficijent zračenja. Nadalje može se pisati

$$dQ = -GcdT_m = -V\gamma cdT_m \qquad /32/$$

Iz ovoga slijedi pripadajući kriterij sličnosti

$$K_G = \frac{l \cdot \lambda_\omega}{tT^3 a C_{12}} \qquad /33/$$

Povišenje temperature uslijed plastične deformacije slijedi iz uvjeta, da je ukupan rad deformacije pretvoren u toplinu izražen sa

$$\Delta T = \frac{k_{wm} \cdot \phi}{\gamma c} \qquad /34/$$

Ovdje je k_{wm} srednji otpor plastičnog oblikovanja, a ϕ logaritamski stupanj deformacije. Razmatranje sličnosti daje pisano pomoću kriterija sličnosti

$$K_7 = \frac{F}{A \Delta T c \gamma} \qquad /35/$$

Sličnost alata i strojeva za preoblikovanje - kod mehaničkih dijelova strojeva za preoblikovanje kao i alata, uzimaju se u obzir samo elastične deformacije i sile inercije. Na taj je način broj odgovarajućih kriterija sličnosti manji, pa su kod navedenih jednadžbi stavljene samo druge fizikalne konstante označena indeksom M.

Elastostatička sličnost

$$\kappa = \frac{G_M}{\bar{G}_M} \lambda^2 = \frac{E_M}{\bar{E}_M} \lambda^2 \qquad /36/$$

$$K_8 = \frac{F}{G_M A} \qquad /37/$$

$$K_9 = \frac{F}{E_M A} \qquad /38/$$

Dinamička sličnost

$$\kappa = \frac{\rho_M}{\bar{\rho}_M} \frac{\lambda^4}{\tau^2} \qquad /39/$$

$$K_{10} = \frac{Ft^2}{\rho_M A^2} = \frac{F}{\rho_M A v^2} \qquad /40/$$

Sličnost sile teže - u slučaju kod kojih treba razmatrati utjecaj sile teže na alat, kao što je slučaj kod batova, sila je prikazana izrazom

$$F = G = m \cdot g \qquad /41/$$

gdje je G težina, m masa a g ubrzanje sile teže. Time slijedi

$$\kappa = \frac{\rho_M}{\bar{\rho}_M} \lambda^3 \qquad /42/$$

$$K_{11} = \frac{F}{\rho_M l^3} = \frac{F}{\rho_M V} \qquad /43/$$

gdje je sa V označen volumen.

3. Razmatranje zakona sličnosti

Potpuna sličnost u ovdje razmatranom značenju, bit će postignuta samo u onom slučaju kada će svaki od jedanaest kriterija sličnosti biti zadovoljen. U pogledu izbora vremena za tehničko je ispitivanje naročito povoljno da odnos vremena bude isti i za model i tijelo u prirodnim uvjetima tj. $\tau = 1$. U tom je slučaju brzina deformacije izražena odnosom 1/vrijeme. Drugi slučaj nastupa kod istovremenog ispunjavanja plastostatičke, elastostatičke i dinamičke sličnosti čime je definiran odnos vremena $\tau = \lambda$. Tehnički i fizikalno povoljno je da odnos temperature bude $\Theta = 1$. Ovime su prikazana dva važna slučaja interpretacije provodjenja modelnog ispitivanja u tehnici preoblikovanja. U tablici i na sl. 1 prikazana su ova dva osnovna slučaja ispunjavanja uvjeta sličnosti. Sa znakom "+" označeno je zadovoljavanje odredjenog kriterija sličnosti, a sa "-" ako odgovarajući kriterij nije ispunjen. U legendi je označeno koji osnovni zakoni vrijede u slučaju "a", a koji su ispunjeni u slučaju "b". Iz komparacije odgovarajućih jednadžbi može se uočiti da nije moguće ispunjavati sve kriterije sličnosti istovremeno. Primjerice, iz jednadžbe /29/ slijedi da je odnos vremena kod sličnosti provodjenja topline definiran kao $\tau = \lambda^2$. U slučaju zadovoljavanja sličnosti sile teže iz jednadžbi /42/ i /43/ slijedi da je odnos vremena definiran kao $\tau = \sqrt{\lambda}$. Na taj način o postavljenom zadatku ovisi koje će karakteristične veličine u pojedinim slučajevima imati prednost.

I Sličnost izratka Vrsta sličnosti	Kriterij sličnosti	Jednadžba	Slučaj "a"	Slučaj "b"
plastostatička sličnost	K_1	11	+	(+)
elastostatička sličnost (G)	K_2	20	+	+
elastostatička sličnost (E)	K_3	21	+	+
dinamička sličnost	K_4	25	-	+
sličnost provodjenja topline	K_5	30	-	-
slič. topline odane zračenjem	K_6	33	-	+
sličnost povišenja temperature uslijed deformacije	K_7	35	+	+

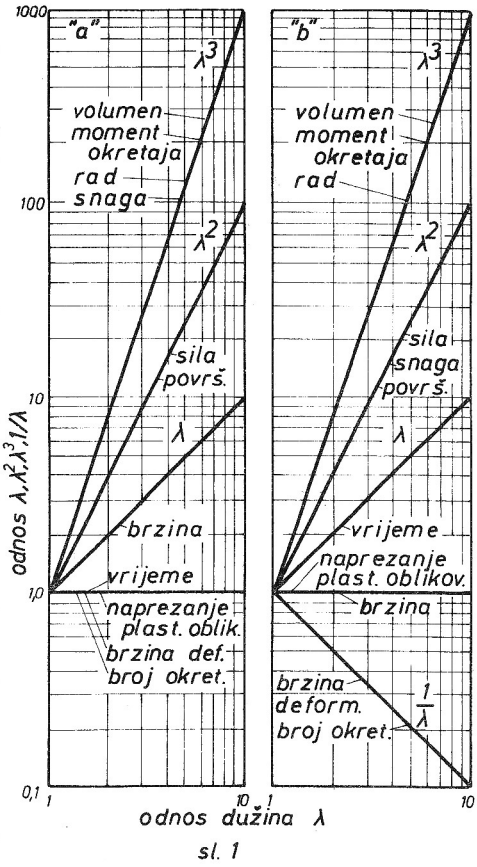
II Sličnost alata i stroja

Vrsta sličnosti	Kriterij sličnosti	Jednadžba	Slučaj "a"	Slučaj "b"
elastostatička sličnost (G)	K_8	37	+	+
elastostatička sličnost (E)	K_9	38	+	+
dinamička sličnost	K_{10}	40	-	+
sličnost sile teže	K_{11}	43	-	-

Slučaj a: $\kappa = \lambda^2$
$\tau = 1$
$\theta = 1$

Slučaj b: $\kappa = \lambda^2$
$\tau = \lambda$
$\theta = 1$

Na sl. 1 označen je izbor odnosa za oba ova slučaja ispunjavanja uvjeta sličnosti kod različitih odnosa dužina, površina, volumena, vremena, broja okretaja, akceleracija, naprezanja, brzina deformacija, sila, momenata okretaja, rada i snaga. Iako je slučaj "b" prikazan kao povoljniji potrebno je uočiti zahtjev da se vremena odnose kao odgovarajuće dužine. Uzme li se u obzir slučaj toplog preoblikovanja kod kojeg naprezanje plastičnog oblikovanja raste s brzinom deformacije i da je ova na strukturi u prirodnim uvjetima λ puta manja, može se konstatirati da naprezanja k_f i $\bar{k}_f$ nisu više jednaka, pa nisu ispunjeni zahtjevi plastostatičke sličnosti. Eventualno kompenziranje povećanja naprezanja plastičnog oblikovanja višom temperaturom procesa nije poželjno jer se narušava termička sličnost. Nadalje, zahtjev za jednakosti koeficijenata kontaktnog trenja μ i $\bar{\mu}$ nije uvijek u potpunosti ispunjen. Jedna od poteškoća leži i u tome što

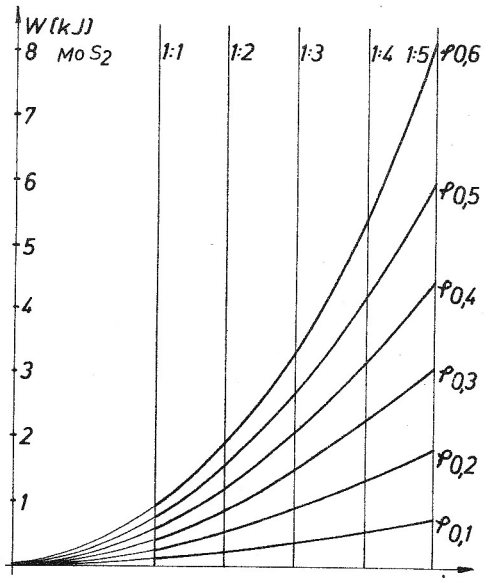


sl. 1

makroskopska sličnost smanjenog izratka povlači za sobom mikroskopsku sličnost površina. Time se na površini tijela u prirodnim uvjetima može pokazati potpuno drugačiji odnos trenja od onog teoretskog. Načelna poteškoća je u tome što je pri izvodu jednadžbe /27/ upotrebljen Coulomb-ov zakon trenja. Poznato je da je u tehnici preoblikovanja ovo samo konvencionalno prikazivanje zakonitosti trenja. U nekim procesima kao na pr. pri hladnom valjanju, postoji vrlo jak utjecaj brzine valjanja na veličinu koeficijenta trenja. Uzimajući sve ovo u obzir, ovdje leži glavni razlog što prijelaz sa rezultata modelnog ispitivanja na tijelo u prirodnim uvjetima nije ponekad udovoljen.

Imajući na umu poteškoće u vezi ispunjavanja kriterija sličnosti i s teoretske i s praktičke strane, odlučeno je da se pokuša ustanoviti u kojoj je mjeri moguće spoznaje teorije sličnosti primijeniti u postupku slobodnog sabijanja izmedju ravnih ploha u hladnom stanju. Sa stanovišta dimenzioniranja strojeva za preoblikovanje i projektiranja tehnološkog procesa kao i postavljanja zahtjeva za odredjenim stupnjem deformacije, najvažniji su podaci za to potrebne sile i rada. U vezi s tim ove su dvije veličine promatrane u smislu primjene teorije sličnosti. Postupak slobodnog sabijanja u hladnom stanju predstavlja složen proces oblikovanja s gledišta napregnutog stanja i odnosa naprezanja - deformacija. U novije vrijeme naročito su intenzivna istraživanja na području hladnog deformiranja metalnih materijala, a ujedno su izbjegnute poteškoće u vezi zadovoljavanja uvjeta termičke sličnosti. U vlastitim pokusima kao probni uzorak uzet je valjak iz Al 99,5%, materijala koji je ispunjavao zahtjev za plastičnom oblikovljivošću u hladnom stanju. Za modelni izradak izabran je valjak dimenzija Ø 9,0 mm i visine 13,5 mm. Za izratke tehničke izvedbe izabrani su slijedeći odnosi dužina kao glavnog parametra geometrijske sličnosti: 1:2; 1:3; 1:4; 1:5, a to zbog toga što je smatrano da će kod njih, budući da se površine i sile odnose kao kvadrati, a volumen i rad kao treće potencije odgovarajućeg geometrijskog odnosa, postojati dovoljno kontrastne razlike da bi se mogli donijeti odgovarajući zaključci. U pogledu zahtjevanih redukcija odnosno veličina deformacija, odlučeno je da se izaberu redukcije koje odgovaraju logaritamskim stupnjevima deformacija $\phi = \ln h_o/h_1$, gdje je

h_o početna visina a h_1 visina nakon deformacije. Ove su redukcije iznosile redom: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6. U postupku ispitivanja odlučeno je da se obave dvije serije pokusa, bez podmazivanja i s podmazivanjem Molycot pastom MoS_2. Ujedno je u cilju ujednačenja uvjeta trenja izvršeno poliranje čeonih površina izradaka, a materijal je normaliziran na temperaturi od 450°C tokom tri sata. Površine alata takodjer su bile polirane.



sl. 2

Postupak sabijanja obavljen je na gravitacionom batu. Iz uvjeta istih brzina deformacija slijedi odnos brzina alata $v/\bar{v}=\lambda$ i odnos masa malja $m/\bar{m} = \lambda$, što znači svjesno napuštanje geometrijske sličnosti stroja. Kako raspoloživa energija malja rezultira iz položaja i mase malja, to je odnos visina pada malja definiran kao $h/\bar{h} = \lambda^2$. Na ovaj je način bio ispunjen zahtjev za odnos vremena $\tau = 1$. Ujedno su zadovoljeni osnovni uvjeti navedeni u varijanti "a" u tablici i prikazani na sl. 1. Svi ovi zahtjevi mogli su biti ispunjeni na raspoloživom uredjaju.

Postignute veličine sile i rada u eksperimentima relativno su se dobro poklapale sa onim veličinama koje su potrebne prema jednadžbama /13/ i /14/ iz teorije sličnosti. Odstupanja od onih izraza koja su ustanovljena bila su u granicama $\mp$ 11% što se može smatrati dozvoljenim u dobroj aproksimaciji. Kod toga je ustanovljen dominantan utjecaj koeficijenta kontaktnog trenja na dobivene rezultate, pa su zato komparabilni samo pokusi izvedeni sa istim mazivom. Medjutim postavilo se pitanje mogu li se dobiveni rezultati obuhvatiti na način koji bi omogućio proširenje spoznaje o mogućnosti primjene teorije sličnosti. Rezultati izmjerenih sila i radova unešeni su u dijagrame gdje su sila i rad prikazani u ovisnosti ne samo od geometrijskog odnosa nego i stupnja deformacije

(Sl. 2). Dijagramski prikaz pokazao je sličan karakter ovih krivulja. Na osnovu ovoga izvršena je regresiona analiza i aproksimacija aproksimacionim polinomom za silu $F = f(\lambda,\phi)$, i za rad $W = f(\lambda,\phi)$, pa je ustanovljeno da se sila i rad mogu predstaviti slijedećim izrazima:

$$F = (a_o + a_1\phi^2) + (a_2 + a_3\phi + a_4\phi^3)\lambda^2 \qquad /44/$$

$$W = (a_o + a_1\phi) + (a_2 + a_3\phi + a_4\phi^2)\lambda^3 \qquad /45/$$

Utvrdjeno je takodjer da se uvodjenjem u razmatranje stupnja deformacije, gdje su sila i rad prikazani kao funkcija isključivo relativnih odnosa, geometrijskog odnosa λ i stupnja deformacije ϕ, odstupanja eksperimentalnih i teoretski potrebnih vrijednosti sila i rada bitno smanjuju. Ova su prosječna odstupanja bila u granicama manje od 3%. Ujedno visoka vrijednost koeficijenata determinacije (>0,998) i višestruke korelacije (>0,999), kao i mala odstupanja svakog pojedinog koeficijenta regresionih polinoma definiranih standardnom greškom, omogućuje da se dobiveni podaci mogu koristiti za odredjivanje potrebnih parametara sile i rada. To je, dakle, moguće za istraživani slučaj i kada modelni izradak nije onakovih dimenzija kakav je bio u ovom istraživanju. Dovoljno je rezultat novog modelnog ispitivanja reducirati na onaj iz tablice ili dijagrama dobivenih na osnovu aproksimacionih polinoma. Time se dobiva faktor korigiranja odredjenih rezultata. Kod toga je potrebno uočiti da ovo vrijedi za istraživani materijal i uvjete pokusa. Pri tome geometrijski odnos $\lambda = 1{:}5$ nije i granična mogućnost primjene teorije sličnosti za ovakav proces preoblikovanja.

L i t e r a t u r a

/1/ Hill R., The mathematical theory of plasticity, Oxford University, 1950.

/2/ Pawelski O., Plastomechanische Grundlagen der Kaltumformung, D.G. für Metallkunde, 1969.

/3/ Povrzanović A., Predavanja kolegija "Oblikovanje metala deformiranjem II", 1979.

/4/ Kienzle O., Mechanische Umformtechnik, Springer Verlag, N.Y., 1968.

/5/ Backofen A.W., Deformation processing, AWPC, California, 1977.

/6/ Bridgman P.W., Dimensional analysis, Yale U., London, 1978.

/7/ Sedov L.I., Metode sličnosti i razmjernosti u mehanici, Nauka, Moskva, 1977.

/8/ Pawlowski J., Die Ahnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung, Springer Verlag, Berlin, 1971.

/9/ Venikov V.A., Teorija sličnosti i modeliranja, Viša škola, Moskva, 1976.

/10/ Math M., Prilog primjeni teorije sličnosti u oblikovanju metala deformiranjem, magistarski rad, FSB, Zagreb, 1981.

MATH M.

PRILOG RAZMATRANJU TEORIJE SLIČNOSTI U PROCESIMA PLASTIČNOG OBLIKOVANJA

R e z i m e

Fizikalni odnosi izmedju dimenzionalnih veličina mogu se izraziti funkcijama bezdimenzionalnih parametara koji se sastoje od sudjelujućih veličina. Takovi parametri poznati su kao kriteriji sličnosti. U skladu sa teorijom sličnosti ti odnosi - uvjeti sličnosti - moraju zadovoljiti numeričku jednakost odgovarajućih kombinacija svih parametara i modelnog i stvarnog procesa.

Ova teorija je takodjer osnova za modeliranje plastičnih deformacija kao fizikalnog procesa. U ovom radu prikazan je pregled zakona sličnosti koji mogu biti od važnosti u procesima preoblikovanja, kao i rezultati eksperimentalnih istraživanja jednog procesa, a to je tlačenje.

CONTRIBUTION TO APPLYING THEORY OF SIMILARITY IN DEFORMATION PROCESSING

S u m m a r y

Complete physical relationships between dimensional quantities can be expressed by function of nondimensional parameters consisting of the participating quantities. Such parameters are known as similarity figures. In accordance with the theory of similarity these relationships - the conditions of similarity - must satisfy the numerical equality of the respective combinations of all parameters of the modelled process and these of the actual behaviour.

This theory is also the basis for the modelling of plastic deformations as a physical process. In this study is given a list of laws of similarity theory that can be of importance in the processes of deformation, as well as results of experimental researches of one specific kind od deformation pressworking.

PRILOG ANALIZI PONAŠANJA MATERIJALA U OBRADNOM SISTEMU ZA NEKE PROCESE SA RAZNOSMERNIM MEHANIČKIM ŠEMAMA GLAVNIH NAPONA

Dr Vlado VUJOVIĆ, profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad

1. Uvod

U procesima obrade metalnih materijala deformisanjem aktuelna je problematika moguće veličine deformacije u jednoj operaciji ili u više operacija do medjuoperacijskog žarenja. Veličina moguće deformacije je često limitirajući faktor primene odredjene tehnologije obrade na materijale, koji su konstrukcijom unapred uslovljeni. Tamo gde iz razloga racionalnosti procesa nije moguće primeniti obradu deformisanjem, zbog moguće male deformacije, primenjuju se po pravilu znatno skuplje metode obrade skidanjem strugotine. Dosta je rasprostranjeno mišljenje da je primena obrade deformisanjem uglavnom determinisana vrstom materijala obratka, a izostavlja se jedan ceo kompleks problematike koji se odnosi na uticaj obradnog sistema na ponašanje materijala u toku procesa obrade. U odnosu na ovu problematiku trebalo bi postepeno menjati klasične poglede da veličina moguće deformacije pri obradi materijala deformisanjem zavisi pretežno od vrste materijala. Obradivost materijala deformisanjem ili kako se često kaže deformabilnost materijala trebalo bi posmatrati kao potencijalnu mogućnost materijala, koja će biti u manjoj ili većoj meri iskorišćena - aktivirana, zavisno od naponskog stanja koje dominira u toku procesa obrade, odnosno iskorišćenje potencijalnih mogućnosti deformabilnosti materijala bitno zavisi od konstrukcije obradnog sistema pomoću koga se realizuju naponska stanja u toku

procesa obrade. U ovom prilogu se želi skrenuti pažnja na neka razmišljanja u ovom pravcu sa konkretnom primenom na analizu procesa obrade dubokim izvlačenjem i obrade vučenjem kao tipičnih procesa sa raznosmernim mehaničkim šemama glavnih napona.

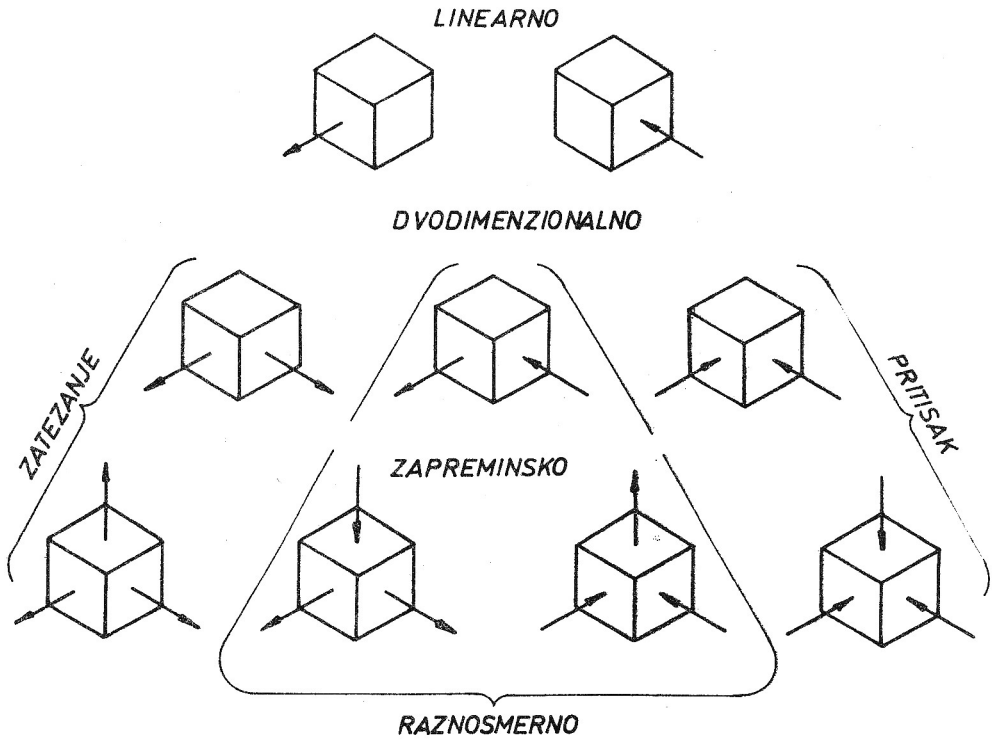
Ova razmatranja su deo šire problematike koja se izučava u okviru istraživačkog projekta: "Istraživanje odnosa obradnog sistema i obradivosti materijala u procesima obrade metala deformisanjem", koji se u Novom Sadu obradjuje kao višegodišnji projekat.

2. Mehaničke šeme deformacija i napona i njihov uticaj na ponašanje materijala u obradnom sistemu

Kvalitativna analiza glavnih komponenata deformacija i glavnih komponenata napona ima izuzetan značaj za izučavanje ponašanja materijala u obradnom sistemu pri obradi deformisanjem.

Na sl. 1. prikazuju se moguće šeme komponenata glavnih napona imajući u vidu broj vektora glavnih napona (jedan, dva ili tri) i njihove smerove.

Ako se ima u vidu sedam mogućih šema napona za dvo- i trodimenzionalno naponsko stanje i tri moguće šeme glavnih deformacija (rastezanje, smicanje i sabijanje) onda se dobija 21. naponsko deformaciona šema i ako se ovome dodaju dve mogućnosti za linearno naponsko stanje onda se dobija ukupno 23 moguće kombinacije naponsko-deformacionih šema. Može se tvrditi da naponsko deformaciona šema procesa uglavnom odredjuje tehnološku metodu obrade. Medjutim, različite tehnološke metode obrade omogućavaju različito aktiviranje potencijalnih mogućnosti deformabilnosti materijala. Opšte je poznato da se znatno manje deformacije mogu realizovati u procesima vučenja nego u procesima hladnog istiskivanja (istosmernog) za koje važi ista mehanička šema glavnih deformacija (rastezanje), ali su u pitanju različite mehaničke šeme glavnih napona. U drugom slučaju u pitanju je istosmerna, pritiskujuća šema napona, a u prvom raznosemrna šema sa dva pritiskujuća i jednim zatežućim naponom. Kod procesa vučenja, kao što je poznato niskougljenični čelik može da podnese logaritamsku deformaciju do max. 40%, medjutim isti taj materijal pri obradi istosmernim hladnim istiskivanjem



Sl. 1. Mehaničke šeme glavnih komponenata napona

može da se deformiše preko 120% mereno kao logaritamska deformacija.

Već ovaj primer ukazuje na veoma značajnan uticaj mehaničke šeme napona na ponašanje materijala u obradnom sistemu. Relativan odnos naponskih komponenti ima takodje veliki uticaj na ispoljavanje obradivosti materijala, ovde se medjutim ne ulazi u tu suptilniju analizu, već se zadržava na kvalitativnom nivou koji se odnosi samo na postojanje naponskih komponenata i njihov smer.

Za analizu uticaja naponskog stanja na ispoljavanje obradivosti materijala deformisanjem značajno je razlaganje ukupnog tenzora napona na sverni tenzor i devijatorski deo.

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$D_\sigma = T_\sigma - T_1 \cdot \sigma_{sr} \quad (2)$$

Gde su:

T_σ - ukupni tenzor napona

D_σ - devijator napona

$T_1\sigma_{sr}$ - sverni tenzor

Naponska stanja kod kojih je ispunjen uslov

$$T_1\sigma_{sr} = 0 \quad (3)$$

nazivaju se čeisto devijatorska naponska stanja.

Sa stanovišta ispoljavanja deformabilnosti materijala zanimljivo je poći od čisto devijatorksog naponskog stanja pri kome je srednji hidrostatički pritisak jednak nuli. Ostala naponska stanja mogu se u ovom pogledu smatrati kao izvedena putem dodavanja pozitivnog ili negativnog svernog tenzora. Interesantno je pitanje kakvo ispoljavanje potencijalnih mogućnosti deformabilnosti treba očekivati pri čistom devijatorskom naponskom stanju i zatim šta će se dogadjati sa tim mogućnostima ako se dodaje pozitivna vrednost svernog tenzora, odnosno ako se dodaje njegova negativna vrednost.

U analizama obradivosti materijala koristi se izraz:

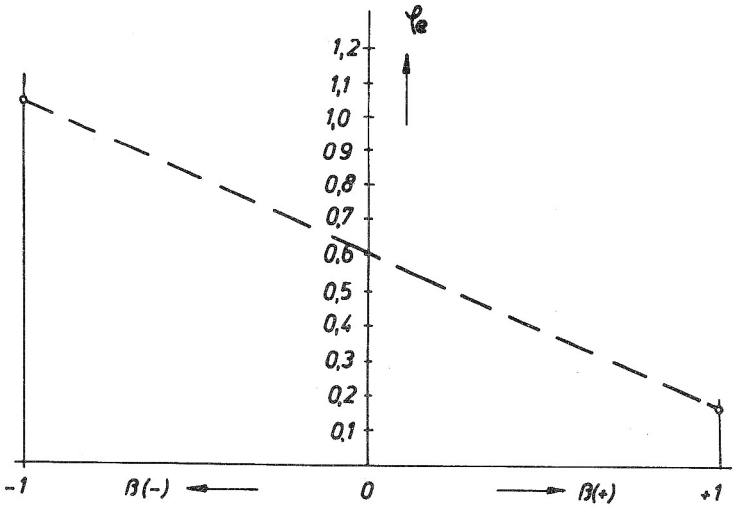
$$\beta = \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{\sigma_e} \quad (4)$$

koji se naziva pokazateljem naponskog stanja. U ovom izrazu σ_e je efektivni napon, koji predstavlja skalarnu invarijantu naponskog sistema. Čisto devijatorsko naponsko stanje biće ako je:

$$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3 = 0,$$

pošto je tada $\sigma_{sr}=0$, a to odgovara uslovu da je $\beta=0$. Iz ovoga proizilazi zaključak da postoji poseban interes za izučavanje obradivosti materijala u uslovima čisto devijatorskog naponskog stanja. Sa sl. 2. može

se uočiti da devijatorsko naponsko stanje omogućava ispoljavanje deformabilnosti odredjene veličine. Dodavanje pozitivnog svernog tenzora,



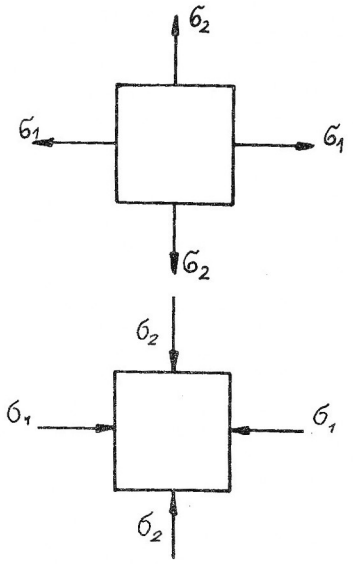
Sl. 2. Prikaz dijagrama granične obradivosti

odnosno kretanje u desno u dijagramu granične obradivosti, izaziva opadanje mogućnosti iskorišćavanja potencijala materijala za obradu deformisanjem i to utoliko više ukoliko je veća vrednost dodatog tenzora. Dodavanje negativne vrednosti svernog tenzora uvećava mogućnost iskorišćenja deformabilnosti materijala i to u toliko više ukoliko je veća apsolutna vrednost negativnog svernog tenzora.

3. Ponašanje materijala u obradnom sistemu sa raznosmernim mehaničkim šemama komponenata glavnih napona

Na slici 1. posebno su označene raznosmerne šeme glavnih napona. Ima ih ukupno tri: jedna dvodimenzionalna i dve trodimenzionalne. Raznosmerne šeme napona su posebno interesantne, jer omogućavaju početak plastičnog tečenja uz manja opterećenja obradnog sistema. Osim toga u uslovima ovih šema moguće je promenom veličine pojedinih naponskih komponenata tako podesiti da njihov zbir bude jednak nuli, kada se

realizuje obrada uz najmanja opterećenja. Poznato je da kod dvodimenzionalnog naponskog stanja prema jednačini plastičnosti ako su jednosmerne šeme napona onda razlika naponskih komponenata treba da dostigne granicu tečenja, a kod raznosmernih šema dovoljno je da zbir ovih komponenata dostigne granicu tečenja što ilustruje sl. 3.



$\sigma_1 - \sigma_2 = \beta\sigma_e$

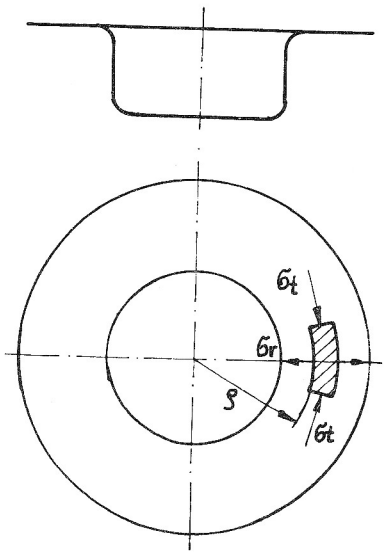
$\sigma_1 + \sigma_2 = \beta\sigma_e$

Sl. 3. Istosmerna i raznosmerna šema dvodimenzionalnog naponskog stanja

Ovo se posebno dobro vidi iz geometrijske interpretacije uslova plastičnosti za dvodimenzionalno naponsko stanje, pri kome delovi elipse u II i IV kvadratu dekartovog koordinatnog sistema imaju najmanje odstojanja od koordinatnog početka, što znači da se uz najmanja opterećenja obradnog sistema ostvaruje početak plastičnog tečenja.

U obradnom sistemu za vučenje žice može se realizovati čisto devijatorsko naponsko stanje ako se zatežući napon izjednači sa radijalnim pritiskujućim naponima. U tom slučaju moguće je realizovati graničnu vrednost logaritamske deformacije 0,5 do 0,7.

U obradnom sistemu za duboko izvlačenje takodje je moguće ostvariti čisto devijatorsko naponsko stanje ako se izjednače radijalni (zatežući) i tangencijalni (pritiskujući) naponi.



Sl. 4. Skica procesa dubokog izvlačenja

Za slučaj prve operacije dubokog izvlačenja devijatorsko naponsko stanje će biti ako je ispunjen uslov:

$$\sigma_r = \sigma_t \tag{5}$$

Iz analize procesa dubokog izvlačenja poznato je da važe relacije:

$$\sigma_r = 1{,}1\sigma_{esr} \ln \frac{R_o}{\rho} \quad \text{i}$$
$$\sigma_t = 1{,}1\sigma_{esr} \left(1-\ln \frac{R_o}{\rho}\right) \tag{6}$$

obzirom na uslov (5) dobija se:

$$2 \ln \frac{R_o}{\rho} = 1 \qquad \text{odnosno}$$

$$\frac{R_o}{\rho} = e^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

ili

$$\rho = R_o . e^{-\frac{1}{2}} \tag{7'}$$

Čisto devijatorsko naponsko stanje će se realizovati samo u zoni za koju važi odnos izmedju početnog radijusa pripremka R_o i tekućeg radijusa

ρ odredjen relacijom (7). Za područje gde važi:

$$\rho < R_o e^{-\frac{1}{2}}$$

naponsko stanje će biti devijatorsko sa dodatim pozitivnim svernim tenzorom a u oblasti gde važi:

$$\rho > R_o e^{-\frac{1}{2}}$$

naponsko stanje će biti devijatorsko sa dodatim negativnim svernim tenzorom. Ovi zaključci proizilaze na osnovi zakona promene radijalnog i tangencijalnog napona u funkciji od radijusa čestica materijala koje se deformišu.

Zbog izloženog ne može doći u obzir nastajanje pukotine u materijalu u zoni za koju važi:

$$\rho > R_o e^{-\frac{1}{2}},$$

jer je to zona sa dodatim negativnim svernim tenzorom, koji povećava mogućnosti ispoljavanja obradivosti materijala. Medjutim u ovoj zoni postoji opasnost od stvaranja nabora zbog dominantne uloge pritiskujućeg tangencijalnog napona. Pukotine mogu nastati u zoni za koju važi:

$$\rho < R_o e^{-\frac{1}{2}}$$

jer u toj oblasti dominantnu ulogu imaju radijalni, zatežući naponi.

Imajući u vidu numeričke vrednosti izraza $e^{-1/2}$ dobija se da će devijatorsko naponsko stanje biti za odnos

$$\rho = 0{,}61\ R_o$$

Iz ovoga se mogu izvući odredjeni zaključci u vezi konstrukcije obradnog sistema u smislu dimenzionisanja unutrašnjeg prečnika držača lima. Područje u kome je dodat pozitivni sverni tenzor kao i područje gde su u pitanju male apsolutne vrednosti negativnog svernog tenzora ne treba biti pokriveno držačem lima, pošto na tom sektoru ne postoji izražena opasnost od nabaranja lima.

U ovoj analizi nije prikazan uticaj držača lima na promenu napon-

skog stanja, medjutim takva analiza je izvršena. Držač lima svojim delovanjem unosi u obradni sistem još jednu pritiskujuću komponentu normalnog napona. I ako je držač lima prevashodno namenjen sprečavanju nabaranja lima, on pozitivno deluje i na ispoljavanje svojstava deformabilnosti materijala, jer ta naponska komponenta utiče da ceo naponski sistem bude negativniji i zbog toga pomera zonu čistog devijatorskog naponskog stanja prema unutrašnjosti. Medjutim, analizom numeričkih odnosa zaključuje se da držač lima može najviše uticati sa 10 do 20%. Na taj način za kvalitativne ocene ponašanja materijala u obradnom sistemu može se koristiti i aproksimativna analiza bez držača lima kako je to u ovom saopštenju dato.

U drugim slučajevima gde postoje zatežući i pritiskujući naponi mogu se utvrditi uslovi pri kojima nastaje čisto devijatorsko naponsko stanje. Važno je te uslove utvrditi pošto se sigurno sa porastom pozitivnih naponskih komponenata (dodavanjem pozitivnog svernog tenzora) sigurno brzo ulazi u opasnu zonu gde mogu nastati pukotine u materijalu. Medjutim, dodavanjem negativnog svernoq tenzora na čisto devijatorsko naponsko stanje deluje se blagotvorno na aktiviranje potencijalnih mogućnosti deformabilnosti sadržanih u materijalu. Ovakve i slične analize ponašanja materijala u obradnom sistemu obzirom na odnose naponskih komponenata mogu značajno da doprinesu adekvatnijem konstruisanju obradnog sistema u smislu ostvarenja većih vrednosti deformacija u jednoj operaciji bez ulaženja u opasnu zonu narušavanja integriteta materijala odnosno bez opasnosti od nastajanja pukotine.

4. Zaključak

Kvalitativna analiza odnosa glavnih naponskih komponenata u obradnom sistemu preko mehaničkih šema komponenata glavnih napona omogućava ocenu mogućnosti iskorišćenja raspoloživih potencijalnih mogućnosti deformabilnosti materijala. Poseban značaj u ovoj analizi imaju veličina i znak svernog tenzora napona. Za slučaj da je on jednak nuli ostvaruje se poseban slučaj koji se naziva čisto devijatorsko naponsko stanje. Utvrdjivanje uslova i položaja kada će se i u kom delu obratka pojaviti čisto devijatorsko naponsko stanje može imati odlučujući značaj za

optimalno oblikovanje, konstruisanje obradnog sistema s obzirom na mogućnost iskorišćavanja resursa obradivosti materijala. Ova analiza ima poseban značaj za slučajeve obradnih sistema u kojima se realizuju raznosmerne šeme naponskog stanja, jer je u takvih sistema uvek moguće realizovati i čisto devijatorsko naponsko stanje. Poseban značaj ovakvih analiza nalazi se u saznanju da su potencijalne mogućnosti deformabilnosti materijala uvek dovoljno velike, a da njihovo iskorišćenje (aktiviranje) pre svega zavisi od adekvatnog konstruisanja obradnog sistema. Ta saznanja otvaraju širom vrata daljem ubrzanom razvoju primene obrade deformisanjem u oblastima u kojima se do nedavno smatrala nemoguća ova primena.

Literatura

1. Storožev M.V., Popov.E.A.: Teorija obrabotki metalov davlenijem, Mašinostroenije, Moskva 1971.
2. Vujović, V.: Istraživanje uticaja promene devijatorskog dela tenzora napona na obradivost materijala u procesima obrade deformisanjem, Novi Sad, Mart 1981., Projekat je radjen prema ugovoru sa SIZ-om za naučni rad Vojvodine
3. Vujović,V.: Istraživanje uticaja različitih stanja jednog domaćeg čelika na obradivost hladnim zapreminskim oblikovanjem, Novi Sad, Mart 1976. - doktorska disertacija.

Vujović V.

Zusammenfassung

Die Beurteilung der potenziellen Umformmöglichkeiten von metallischen Werkstoffen ist auch durch die kvalitative Analyse der Hauptspannungskomponenten in einem Bearbeitungssystem mit Hilfe von Schaubildern möglich. Die Grösse und das Vorzeichen des Kugeltensors speilen dabei die entscheidende Rolle. Im Fall dass dieser Tensor gleich Null ist wird ein spezifischer, so genannter deviatorischer Spannungszustand hervorgerufen. Die Untersuchung von Bedingungen in denen so ein Zustand ensteht kann von grosserer Bedeutung bei der optimalen Konstruktion des ganzen Bearbeitungssystems sein.Diese Analyse ist besonders in solchen Fällen von Bedentung in denen die Spannungsschanbildern mit unterschiedlichen Spannungsvorzeichen sind. Die potenzielle Umformmöglichkeiten eines metallischen Werkstoffes sind immer genügend gross, für ihre optimale Ausnützung muss aber die Konstruction des Bearbeitungssystem entsprechend ausgelegt sein.

RAZLIČITE VARIJANTE PRIMENE METODE GORNJE GRANICE

Mr Miroslav PLANČAK, dipl.ing., asistent Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Metoda gornje granice

Pojava nepremostivih matematičkih teškoća prilikom rešavanja problema obrade deformisanjem tz. "egzaktnim" putem tj. konsekventnom primenom teorije prlastičnosti uslovila je razvoj metoda kojima se osnovni parametri procesa mogu odrediti približno. Jedna od takvih je i metoda gornje granice. Ovom metodom moguće je odrediti veličinu deformacione sile i deformacionog rada za odredjeni proces deformisanja.

Metoda gornje granice zasniva se na ekstremalnom principu koji glasi: od svih kinematski dozvoljevnih polja brzina stvarno kinematsko polje čini izraz (1) minimalnim.

$$L = L_1+L_2+L_3 = \frac{2\sigma e}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\,dv + \int_A \tau\,|\Delta v|\,dA - \int_A \sigma_i v_i\,dA \qquad (1)$$

L_1 - snaga unutrašnjeg deformisanja

L_2 - snaga koja se troši na diskontinuitetima brzina i na spoljašnje trenje

L_3 - snaga spoljnih napona. Ovaj član samo se izuzetno pojavljuje, (npr. u slučaju vučenja sa protiv silom i sl.)

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ - brzina deformacije

Δv - relativna brzina na granicama diskontinuiteta

τ - tangencijalni napon

Kinematski dozvoljeno polje brzina je svako polje koje zadovoljava grànične uslove i uslove kontinuiteta.

Iz analize izraza (1) uočava se da je polazni korak u rešavanju problema deformisanja metodom gornje granice definisanje kinematski

dozvoljenog polja brzina u obradku za vreme procesa deformisanja. Obzirom da je u najvećem broju slučajeva deformisanja nemoguće dati takav opis kinematskog polja koje bi u podpunosti odgovaralo stvarnom polju i obzirom na gore iznetu definiciju principa na kojem bazira ova metoda, jasno je da je proračunata deformaciona sila uvek veća od stvarne sile koja vlada u procesu. Razlika izmedju proračunate i stvarne sile utoliko je manja ukoliko je tačnije opisano polje brzina po zapremini obradka.

Polje brzina može se definisati analitičkim i grafičkim putem.

Analitički način definisanja kinematski dozvoljenog polja brzina sastoji se u tome da se izaberu (odrede) pogodne matematičke funkcije koje opisuju to polje respektujući pri tome uslov kontinuiteta i granične uslove. Pri tome je moguće da se ukupna zapremina tela podeli na zone u kojima se predpostavljaju različiti zakoni brzina. Na granicama takvih zona pojavljuju se diskontinuiteti brzina koji zahtevaju dodatni spoljni rad.

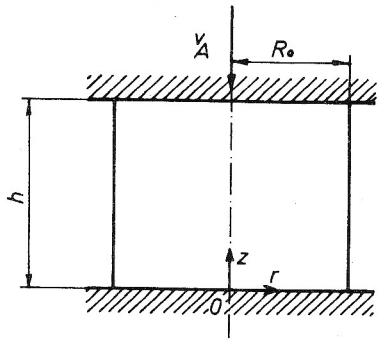
Izbor pogodnih matematičkih funkcija za opis polja brzina zavisi od konkretne geometrije procesa, od željene tačnosti rešenja pa i od intuicije samog istraživača. Često se, u cilju što tačnijeg definisanja polja brzina, vrše i eksperimentalna istraživanja toka čestica u zapremini tela.

Željena tačnost rešenja utiče na izbor matematičkih funkcija u tom smislu što se za manje tačna rešenja biraju jednostavnije funkcije koje čine integraciju izraza (1) jednostavnijom. Dobijeno rešenje u tom slučaju znatno odstupa od stvarnog. Složenije funkcije tačnije opisuju stvarno polje brzina pa su i rešenja dobijena pomoću takvih funkcija bliža stvarnim. Ali, tu se često pojavljuje problem matematičke obrade tj. integracije takvih funkcija.

Avitzur /1/ u analizi slobodnog sabijanja cilindra (sl.1.) predpostavlja sledeće funkcije za radijalnu i aksijalnu brzinu:

$$V_r = V_A \frac{r}{2h} = f(r) \qquad (2)$$

$$V_z = -V_A \frac{z}{h} = f(z) \qquad (3)$$



Sl. 1.

V_A - brzina alata

Uočava se da su predpostavljene brzine u funkciji samo jedne koordinate što svakako predstavlja pojednostavljenu sliku kinematike procesa.

Matematičkim transformacijama koje su u skraćenom obliku date u daljem tekstu i integracijom izraza (1) dobija se izraz za veličinu ukupno potrebne snage.

Brzine deformacije iznose:

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \frac{\partial V_r}{\partial r} \qquad \dot{\varepsilon}_{12} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta}\right) = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_{22} = \frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} \qquad \dot{\varepsilon}_{13} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}\right) = 0 \qquad (3a)$$

$$\dot{\varepsilon}_{33} = \frac{\partial V_z}{\partial z} \qquad \dot{\varepsilon}_{23} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial z}\right) = 0$$

Integral L_1 iz izraza (1) može se prikazati kao:

$$L_1 = \frac{2\sigma_e}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\dot{\varepsilon}_{11}^2+\dot{\varepsilon}_{22}^2+\dot{\varepsilon}_{33}^2+2(\dot{\varepsilon}_{12}^2+\dot{\varepsilon}_{13}^2+\dot{\varepsilon}_{23}^2)}\,dV$$

Zamenom izraza (2) i (3) u (3a) a zatim integraljenjem gornjeg izraza dobija se izraz za snagu unutrašnjeg deformisanja u obliku:

$$L_1 = \sigma_e \cdot V_A \cdot R_o^2 \cdot \pi$$

Snaga trenja na kontaktnim površinama dobija se kao:

$$L_2 = \int \tau \Delta \, dA = \frac{m \cdot \sigma_e}{\sqrt{3}} \int_o^R 2\pi r \cdot V_r dr = \frac{m\sigma_e}{\sqrt{3}} \int_o^R 2\pi r \cdot V_A \cdot \frac{r}{2h} \, dr = \frac{2m\sigma_e \pi \cdot R_o^3 \cdot V_A}{\sqrt{3} \; 3h}$$

Pri tome je tangencijalni napon izražen u obliku:

$$\tau = \frac{m\sigma_e}{\sqrt{3}}$$

Obzirom na $L_3=0$, izraz za ukupnu snagu postaje:

$$L = \sigma_e \cdot V_A \cdot R_o^2 \cdot \pi + 2 \frac{m\sigma_e \cdot V_A \pi \cdot R_o^3}{\sqrt{3} \; 3h} = F \times V_A \qquad (4)$$

tj. deformaciona sila:

$$F = A_o \sigma_e \left(1 + \frac{2mR_o}{3h\sqrt{3}}\right) \qquad (5)$$

m - faktor trenja.

Izvesna nedostlednog ovakvog pristupa sastoji se u tome što se sa jedne strane predpostavlja postojanje kontaktnog trenja a istovremeno brzina u radijalnom pravcu nije u funkciji od "z" koordinate tj. jednaka je na kontaktu materijal-alat i u unutrašnjosti tela.

Nešto kompleksnije rešenje problema slobodnog sabijanja metodom gornje granice dobija se pristupom koga je uvek Steck /2/. U ovom pristupu brzine su u funkciji kako odgovarajućih koordinata tako i jednog korektivnog parametra kojim se uzima u obzir neravnomernost naponsko-deformacionog stanja u obradku. Komponente brzina imaju oblik:

$$V_r = V_A \cdot r\left(\frac{1}{2h} - \frac{ch^2}{12} + cz^2\right) = f(r,z) \qquad (6)$$

$$V_z = 2V_A \cdot z\left(c\,\frac{h^2}{12} - \frac{1}{2h} - c\,\frac{z^2}{3}\right) = f(z) \qquad (7)$$

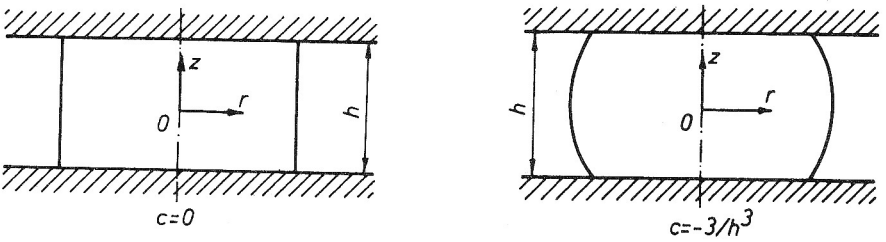
c - korektivni parametar

Za slučaj sabijanja bez trenja parametar ima vrednost nula (c=0) pa komponente brzina postaju:

$$V_r = V_A \cdot \frac{r}{2h} \tag{8}$$

$$V_z = -V_A \cdot \frac{z}{h} \tag{9}$$

(uočava se identičnost sa jednačinama (2) i (3))
U drugom ekstremnom slučaju, kada nema relativnog kretanja izmedju alata i materijala, parametar "c" se dobija iz uslova da je radijalna brzina za z=h/2 jednaka nuli i on iznosi $c=-3/h^3$.



Sl. 2.

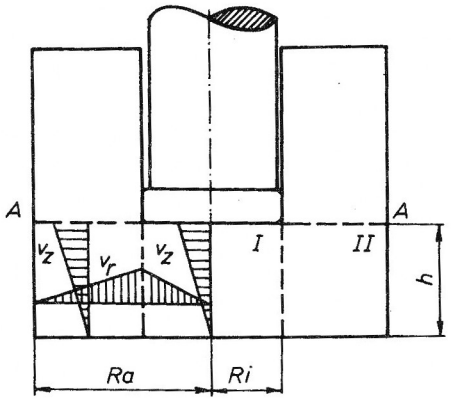
Realne vrednosti parametra "c" leže izmedju ova dva ekstrema a mogu se dobiti procesom minimiziranja ukupne snage.

Složeniji procesi zapreminskog oblikovanja često iziskuju podelu zone deformisanja u nekoliko oblasti koje su medjusobno podeljene granicama diskontinuiteta. Za svaku od tih oblasti posebno se definišu komponente brzina i izračunava ukupna snaga, prema (1). Ukupno potrebna snaga (sila) dobija se kao suma snaga za pojedine oblasti.

Karakterističan primer u tom smislu predstavlja analiza procesa suprotno-smernog istiskivanja /2/. Zona deformisanja (zapremina ispod linije A-A na sl.3) podeljena je u dve oblasti: u oblasti I neposredno ispod žiga raspored brzina je definisan sledećim jednačinama:

$$V_{z_1} = -\frac{V_A \cdot z}{h} \tag{10}$$

$$V_{rI} = \frac{1}{2}\frac{V_A \cdot r}{h} \tag{11}$$



Sl. 3.

U oblasti II takodje se predpostavlja linearna promena brzine a dobija se iz uslova kontinuiteta i sledećih graničnih uslova:

$$z = 0 \qquad V_{zII} = 0$$
$$z = h \qquad V_{zII} = \text{const}$$

Integracijom uslova kontinuiteta uz gornje granične uslove dobijaju se sledeći izrazi za komponente brzina u oblasti II.

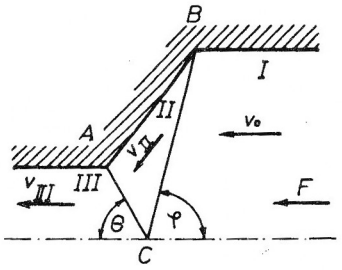
$$V_{rII} = \frac{V_A}{2h} \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} \left(\frac{R_a^2}{r} - r\right) \tag{12}$$

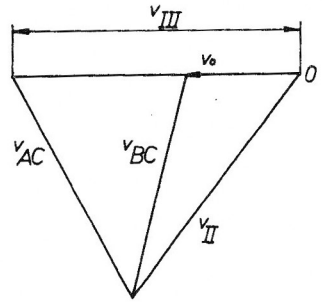
$$V_{zII} = \frac{V_A}{h} \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} z \tag{13}$$

Pošto je na taj način definisano kinematsko polje u zapremini tela, primenom poznatih relacija teorije plastičnosti (3a) i integracijom izraza (1) dolazi se do ukupno potrebne snage deformisanja tj. do njene gornje granice.

Grafička varijanta gornje granice koja je detaljno razradjena od Johnsona /3/ a prihvaćena i usavršavana i od strane drugih naučnika,

sastoji se u tome da se zona deformisanja tela podeli na krute blokove. Ovi blokovi u procesu deformisanja klize jedan po drugom ali se pri tome sami ne deformišu što znači da je brzina svih čestica unutar takvih blokova ista. Ovakvim načinom mogu se rešavati samo ravanski problemi.





Sl. 4.

Na primeru ravanskog istosmernog istiskivanja biće detaljnije prikazana ova varijanta metode gornje granice. Usled simetrije posmatra se samo gornja polovina tela. Ukupna zapremina deli se na tri oblasti. U oblasti I čestice se kreću ulaznom brzinom V_o. Na diskontinuitetu $\overline{BC}$ dolazi do promene brzine čestica i to na taj način da brzina u oblasti II predstavlja zbir ulazne brzine V_o i brzine na diskontinuitetu V_{BC}. Sve tačke unutar zone II kreću se brzinom V_{II}. Na drugoj liniji diskontinuiteta $\overline{AC}$ toj brzini dodaje se brzina na diskontinuitetu V_{AC} čime nastaje rezultujuća izlazna brzina V_{III}. Šema procesa i hodograf brzina pokazani su na sl. 4.

Pošto su na taj način odredjene brzine u pojedinim oblastima kao i na kontinuitetima, dalji postupak sastoji se u integraljenju izraza (1).

Kako unutar pojedinih oblasti ne postoji razlika brzina izmedju čestica materijala, to prvi integral u jednačini (1) postaje jednak nuli. Obzirom da u procesu nema drugih spoljnih sila sem sile deformisanja "F", to se jednačina (1) redukuje na oblik:

$$L = \int_A \tau \Delta V dA \qquad (14)$$

u konkretnom slučaju gornji integral se prevara u izraz:

$$L = \tau(\overline{BC}.V_{BC} + \overline{AC}.V_{AC}) \qquad (15)$$

$\overline{AC}$ i $\overline{BC}$ - površina diskontinuiteta AC i BC uz jediničnu širinu

V_{AC} i V_{BC} - brzina na odgovarajućim diskontinuitetima dobijene iz hodografa brzina.

Na taj način ukupna snaga odredjena je veoma jednostavnim izrazom (15). Gornja granica defomacione sile iznosi:

$$F = \frac{L}{V_A} = \tau(\overline{BC}\,\frac{V_{BC}}{V_A} + \overline{AC}\,\frac{V_{AC}}{V_A}) \qquad (16)$$

Veličina ovako dobijene gornje granice za silu u mnogome zavisi od položaja tačke "c" u šemi procesa tj. od ugla "ϕ". Obzirom na princip na kom je ova metoda zasnovana, ugao "ϕ" predstavlja parametar minimizacije ukupne snage tj. sile.

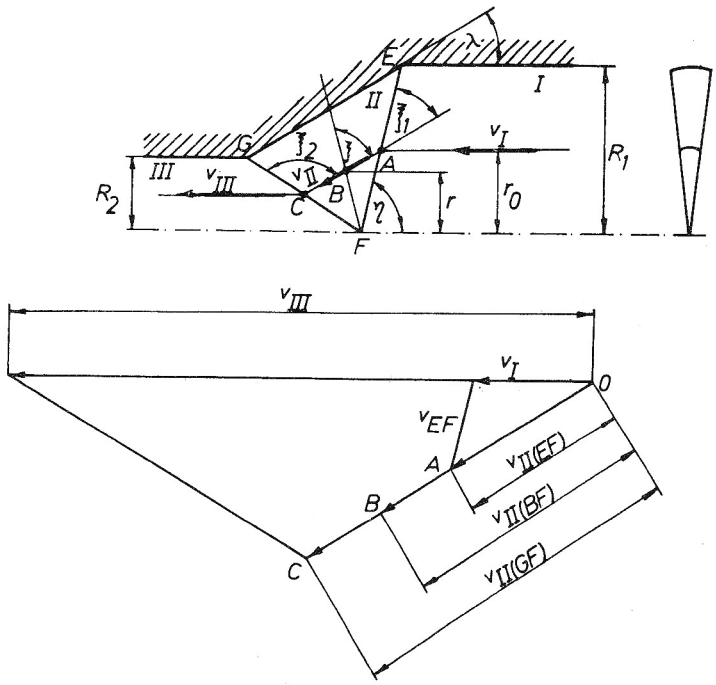
Na način sličan prikazanom moguće je analizirati i čitav niz drugih procesa deformisanja. Veoma iscrpan prikaz i analiza takvih mogućnosti sadržani su u knjizi /3/.

Modifikacije metode gornje granice

Osnovna predpostavka prikazane grafičke varijante metode gornje granice je krutost pojedinih blokova koji u toku procesa deformisanja klize jedan po drugom. Ova predpostavka veoma pojednostavljuje proceduru izračunavanja deformacione sile jer se izraz (1) redukuje samo na jedan integral. Sa druge strane, ovom predpostavkom se znatno udaljuje od realne kinematike procesa pa i rešenja dobijena prikazanom varijantom dosta odstupaju od stvarnih vrednosti.

Druga osnovna predpostavka - ona o ravanskom deformisanju - takodje objektivno ograničava primenu ovog načina odredjivanja deformacione sile.

Za aksialno simetrične probleme predložena je grafičko-analitička metoda /5/ kojom se uzima u obzir i promena brzina unutar pojedinih blokova. Na slici 5. prikazan je proces istosmernog istiskivanja čija je



Sl. 5.

kinematika definisana diskontinuitetima brzina EF i GF. U oblasti I brzina je ista za sve čestice i iznosi V_I. Toj brzini se na diskontinuitetu EF dodaje brzina $V_{(EF)}$ tako da brzina u oblasti II na liniji EF iznosi $V_{II(EF)}$. Čestice materijala u oblasti II kreću se sa promenljivom brzinom (kretanje im se ubrzava). Trenutna brzina u oblasti II iznosi:

$$V_{II} = V_{II(EF)} \cdot \frac{r_o}{r} \qquad (17)$$

Sve čestice u oblasti II koje leže na linijama radijalno povučenim iz tačke F (pol), npr. linija FB, imaju iste brzine kretanja. Sa slike je jasno da diskontinuiteti EF i GF takodje predstavljaju takve linije.

Na hodografu brzina prikazani su vektori brzina u pojedinim oblastima kao i na površinama diskontinuiteta. Vektor $V_{II(EF)}$ predstavlja

brzinu u oblasti II na liniji EF. Brzina čestice u tačci B i na svim tačkama koje leže na liniji BF iznosi $V_{II(BF)}$ dok vektor $V_{II(GF)}$ predstavlja brzinu na liniji GF.

Pošto su na ovaj način odredjene brzine na diskontinuitetima moguće je odredjenim matematičkim transformacijama, koje zbog ograničenosti prostora ovde neće biti prikazane, odrediti veličinu drugog člana (L_2) iz jednačine (1):

$$L_2 = \tau \left| \frac{1}{\operatorname{ctg}\lambda - \operatorname{ctg}\eta} \right| \left| \frac{1}{\sin^2\eta} + \frac{1-r'}{\sin^2 x} \right| \cdot \frac{1}{t} \qquad (18)$$

gde su:

$$\operatorname{ctg} x = \frac{1}{1-r'}(r' \operatorname{ctg}\lambda - \operatorname{ctg}\eta)$$

$$r' = \frac{R_1 - R_2}{R_1}$$

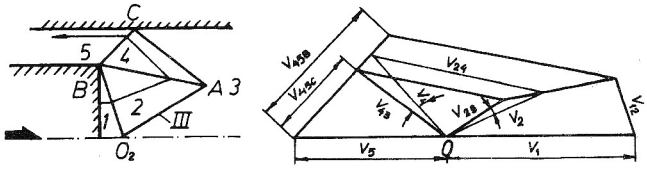
t - vremenski interval

Veličina (18) predstavlja rad po jedinici zapremine koji se troši na površinama diskontinuiteta EF i GF.

Disipacija snage usled promene brzine unutar oblasti II po jedinici zapremine iznosi:

$$L_1 = \frac{\tau}{T} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\sqrt{3} + \frac{1}{\sin^2\xi}}{\sin^2\xi(\operatorname{ctg}\lambda + \operatorname{ctg}\xi)} \, d\xi \qquad (19)$$

Na sličan način može se analizirati i proces suprotno-smernog istiskivanja. Jedan od mogućih modela kinematike procesa kao i odgovarajući hodograf brzina sa odgovarajućim notacijama prikazan je na slici 7.

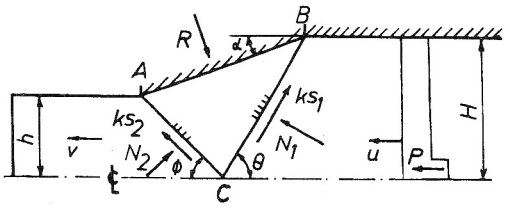


Sl.7.

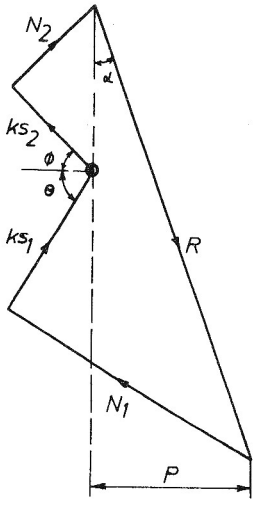
Pristupom zatvorenih poligona sila, koji takodje predstavlja modifikaciju metode gornje granice, veličinu deformacione sile u datom procesu deformisanja moguće je odrediti čisto grafičkim putem.

Zapremina tela koje se deformiše deli se na oblasti u kojima vlada uniformno polje brzina. Na taj način nastaju kruti blokovi koje u procesu deformisanja klize jedan po drugom (sl.8.). Predpostavlja se da na površinama diskontinuiteta vlada tangencijalni napon $K=K_s$, čime je odredjena veličina tangencijalnih sila koje deluju na površinama diskontinuiteta (KS_1 i KS_2). Normalnim silama koje deluju na površine diskontinuiteta (N_1 i N_2) poznati su samo pravci. Kruti blok ABC nalazi se u ravnoteži pod dejstvom sledećih sila: KS_1, N_1, KS_2, N_2, R, gde sila R predstavlja reakciju zida matrice. Na osnovu poznatih veličina i pravaca tengencijalnih sila i poznatih pravaca normalnih sila koje deluju na

a)



b)

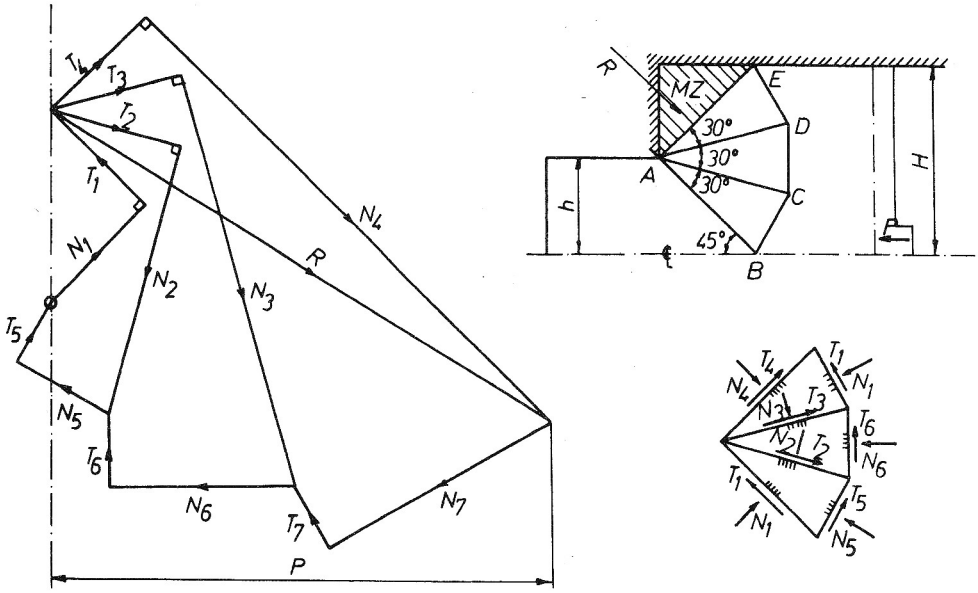


Sl.8.

površine diskontinuiteta, kao i na osnovu poznatih pravaca otpora zida matrice i tražene deformacione sile, moguće je konstruisati zatvoren poligon sila koji kao rezultat daje veličinu deformacione sile P.

Na sl. 8.b. prikazan je poligon sila za proces prikazan na sl. 8.a. uz odgovarajuću oznaku sila i redosleda ucrtavanja u dijagramu.

Nešto kompleksniji slučaj prikazan je na sl. 9. U procesu isto-



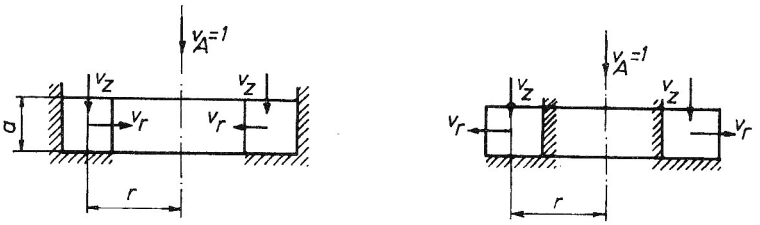
Sl.9.

smernog istiskivanja sa uglom matrice $\alpha=90^{o}$ zona deformisanja je podeljena u tri kruta bloka uz postojanje mrtve zone. Prikazan je raspored normalnih i tangencijalnih sila koje deluju na površinama diskontinuiteta kao i poligon sila sa rezultujućom deformacionom silom P.

U cilju pojednostavljenja i odredjene sistematizacije u analizi komplikovanih aksialno-simetričnih problema deformisanja pomoću metode gornje granice, razvijen je analiztički pristup cilindričnih jediničnih zona deformisanja /6/. Osnovna ideja ovog pristupa sastoji se u tome da se čitava zapremina tela koje se analizira podeli na standardizovane jedinične zone, za koje su predhodno podpuno definisana polja brzina. Da-

lji postupak rešavanja svodi se na odredjivanje disipacija snage u pojedinim jediničnim zonama i na površinama diskontinuiteta brzina. Obzirom na odredjenu unifikaciju jediničnih zona i polja brzina u njima, ovakvim načinom moguće je relativno jednostavnim putem analizirati i veoma složene oblike tela.

Definisano je nekoliko tipova jediničnih zona. Za jednostavnije slučajeve vlada isto brzinsko polje, tz. "paralelno polje brzina". U ovom slučaju komponente brzina definisane su izrazima:



Sl. 10.

Za elemente na sl. 10.a.

$$V_r = \frac{1-r^2}{2ar} \; ; \quad V_z = -\frac{z}{a} \tag{20}$$

Za elemente na sl. 10.b.

$$V_r = \frac{r^2-b^2}{2ar}; \quad V_z = -\frac{z}{a} \tag{21}$$

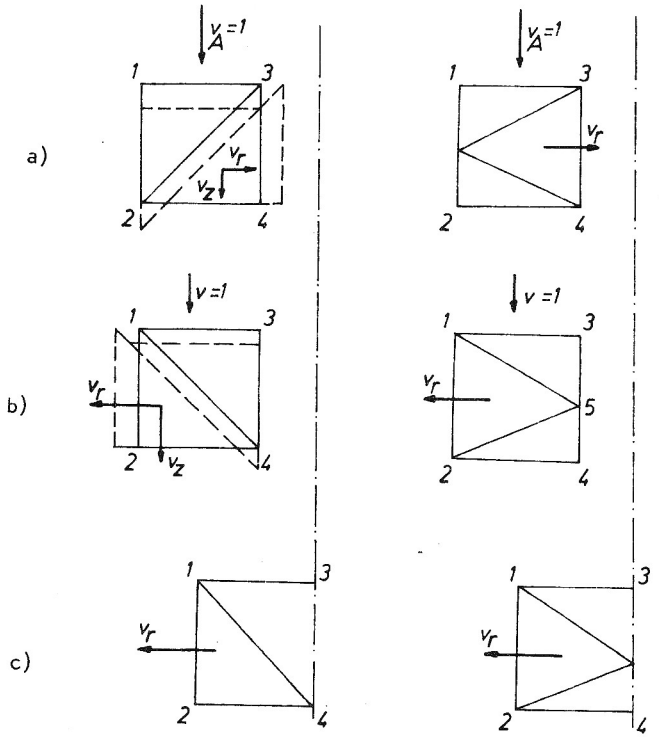
Za komplikovanije oblike tela koje se deformiše pogodnije su jedinične zone prikazane na sl. 11.

Svaka od prikazanih zona predstavlja prstenastu zapreminu koja u preseku ima oblik trougla. Svaka strana trougla predstavlja diskontinuitet brzine. Predpostavlja se da i posle deformisanja jedinične zone zadržavaju oblik trougla.

Jedinična zona deformisanja prikazana na sl. 11.a. sastoji se iz dva dela: trougao 123 kreće se kao kruto telo dok se trougao 234 deformiše. Brzine u radijalnom i aksijalnom pravcu za čestice unutar trougla 234 iznose:

$$V_r = -\frac{1-b}{2a}\cdot\frac{1+r}{r}, \quad V_z = \frac{1-b}{2}\cdot\frac{z}{a} \tag{22}$$

Diferencijacijom ovih komponenata dobijaju se brzine deformacija:



Sl. 11.

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} = \frac{V_r}{r} \qquad (23)$$

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta}\right) = 0$$

Zamenom vrednosti (23) u modifikovani oblik osnovne jednačine gornje granice (1) dobija se vrednost ukupne snage:

$$L = \sqrt{\frac{2}{3}}\,\sigma_e \int_V \sqrt{(\dot{\varepsilon}_v^2+\dot{\varepsilon}_\theta^2+\dot{\varepsilon}_z^2+\frac{1}{2}\gamma_{rz}^2)}\,dV+\tau\int_A \Delta V dA \qquad (24)$$

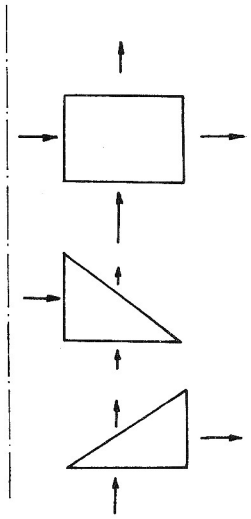
gde su:

ΔV - relativna brzina na diskontinuitetu 2-3

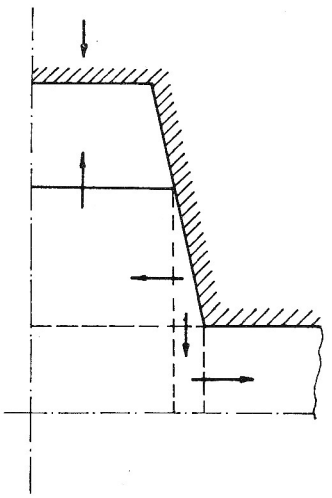
dA - površina diskontinuiteta

Slična analiza može se sprovesti i za ostale tipove jediničnih cilindričnih zona deformisanja.

Na principu podele zapremine tela na elemente odredjenog oblika zasniva se i UBET postupak. Kao i u predhodno prihakaznom postupku definišu se tri osnovna "generalizovana elementa" (sl.12.) za koje su od-



Sl.12.



Sl.13.

redjena paralelna polja brzina pa prema tome i svi članovi osnovne jednačine gornje granice (1).

UBET* postupak prvenstveno je uveden za potrebe analize procesa kovanja a prilagodjen je za upotrebu računara.

Na sl. 13. prikazan je detalj kovanja u kalupu. Odkovak je podeljen na nekoliko generalizovanih elemenata za koje se, posredstvom računara, izračunavaju elementarne disipacije snage. Ukupna snaga a time i potrebna sila dobija se kao zbir snaga svih generalizovanih elemenata.

Osvrt na prikazane varijante metode GG

Metodom gornje granice, čije su razne varijante prikazane u ovom radu, moguće je odrediti deformacionu silu,deformacioni rad i srednji pritisak na alat u procesima obrade metala deformisanjem.

Osnovni problem koji se pojavljuje u primeni gornje granice jeste definisanje polja brzina unutar zapremine obradka. Od toga u kolikoj meri predpostavljeno polje brzina odgovara stvarnom polju brzina zavisi i stepen tačnosti dobijenog rešenja. Obzirom na to da se, sem u izuzetnim slučajevima, stvarno polje brzina ne može podpuno egzaktno prikazati analitičkim ili grafičkim putem i obzirom na princip na kome je zasnovana ova metoda, dobijene vrednosti uvek su veće od stvarnih.

Analitički načini definisanja polja brzina ograničeni su uglavnom na tz. paralelna polja brzina gde komponente brzina zavise samo od jedne koordinate. Jasno je da to predstavlja znatno uprošćavanje kinematske slike što kao posledicu ima značajnije odstupanje dobijenih rezultata od stvarnih vrednosti. U cilju realnijeg prikazivanja polja brzina analitičkim putem moguće je uvodjenje slobodnih parametara u izraze za komponente brzina. Vrednost ovih parametara odredjuje se iz uslova minimuma ukupne snage. Ovakav način u mnogome komplikuje matematičku obradu čak i za jednostavne slučajeve deformisanja.

Za ravanske probleme razvijen je veoma jednostavan grafički metod kojim se brzo i relativno jednostavno dolazi do rezultata. Polja brzina definišu se grafičkim putem preko hodografa brzina. Osnovni nedostavak ovog postupka jeste taj što se unutar jedne zone na koje se zapremina

*UBET - Upper Bound elemental technique

tela deli, predpostavlja konstantno polje brzina.Na taj način ne postoji disipacija snage unutrašnjeg deformisanja nego se ukupna disipacija sastoji iz gubitka na diskontinuitetima i spoljneg trenja.

Modifikacijom grafičke metode ovaj nedostatak je otklonjen tj. uzima se u obzir i promena brzina unutar pojedinih zona. To, medjutim, u mnogome čini ovaj pristup složenijim, pa se osnovna prednost metode - jednostavnost - gubi. To je verovatno jedan od najvažnijih razloga što grafičko-analitička metoda koja uzima u obzir promenu brzina unutar pojedinih zona nije našla širu primenu.

Metoda zatvorenih poligona sila omogućava direktno dolaženje do rezultata (veličine deformacione sile), bez naknadne analitičke obrade grafički dobijenih vrednosti brzina. Ovakav način ograničen je na ravanske probleme.

Čini se da najperspektivniji pravac daljeg razvoja metode gornje granice predstavlja uvodjenje standardizovanih jediničnih zona deformisanja. Ovim načinom mogu se analizirati i najkomplikovaniji oblici deformisanja, kako ravanski tako i aksijalno simetrični. Pored toga omogućuje se široka primena računara, što predstavlja poseban kvalitet. Inkrementalnim pristupom UBET postupka, koji predstavlja jednu varijantu unificiranih zona deformisanja, moguće je ceo proces posmatrati u željenim priraštajima.

Jedan opšti nedostatak metode gornje granice predstavlja zanemarivanje ojačanja materijala u toku deformisanja. Iako se na uklanjanju tog nedostatka radi (npr. uvodjenjem odredjenih korektivnih parametara) opšte prihvaćenog načina još nema.

Dalje usavršavanje metode predstavlja i mogućnost suptilnije podele zapremine tela na osnovne zone uzimajući u obzir pored pravolinijskih i krivolinijske diskontinuitete brzine. Ovaj, pre svega, matematički problem već se u nekim slučajevima uspešno rešava transformacijom koordinata.

Literatura

1. Avitzur: "Metal Forming: Processes and analysis", McGrow-Hill,1968.
2. Steck, E.: Kraftberechnung bei Umformverfahren mit Hilfe der "Oberen Schranke" Werkstattstechnik, 1967, Heft 6

3. Johnson, W.: „Engineering Plasticity" - Van Nostrand - London, 1980.

4. Musafija, B.: Primenjena teorija plastičnosti, Sarajevo, 1974.

5. Adie J.F., Alexander J.M.: A graphical method of obtaining hodographs for upper-bound solutions to axisymetric problems, Int.I.Mech.Sci., vol.9, 1967.

6. Johnson, W., Mamalis, A.G.: Force polygons to determine upper bounds and force distribution in plane strain metal forming processes, materijal u pripremi za štampu

7. Kudo, H.: Some analytical and experimental studies of axi-symetric cold forging and extrusion - I,II,III, Int.J.Mech.Sci., vol.2, 1960.

8. Bramley, A.N., Thornton, J.T.: An aproximate method for predicting metal flow in forging and extrusion operations, The institution of Mech.Eng., vol. 194, No.2, 1980.

9. Rowe, G.W.: Principles of Industrial metalworking Processes, Edward Arnold, London, 1977.

Mr PLANČAK M.

RAZLIČITE VARIJANTE PRIMENE METODE GORNJE GRANICE

R e z i m e

U radu su prikazane neke novije varijante primene metode gornje granice pomoću kojih je moguće odrediti deformacionu silu i deformacioni rad u procesu deformisanja.

Osnovni problem prilikom analize procesa metodom gornje granice jeste definisanje polja brzina u zapremini tela.

Analitički je moguće to polje definisati pogodnim matematičkim funkcijama koje bi zadovoljavale jednačine kontinuiteta i granične uslove. Podelom tela u tz. jednične zone deformisanja za koje su predhodno odredjena polja brzina problem se znatno pojednostavljuje a istovremeno se mogučuje i primena računara.

Prikazane su i grafičko-analitičke varijante metode gornje granice sa posebnim akcentom na varijanti kojom se uzima u ozbir i postojanje razlike brzina unutar pojedinih zona na koje je telo podeljeno.

DIFFERENT WAYS OF APPLICATION OF UPPER BOUND METHOD

S u m m a r y

In this paper some different upper-bound solutions are presented.

The first and most important step in upper-bound analysis is to obtain a velocity field. Kinematically admissible velocity fields may be established in two ways: one is to guess analytical functions to describe the velocity components and the other is to determine velocity components from the geometry of the process.

Some new approaches are shown: Johson's force polygons, Kudós "unit cylindrical deforming region" and a UBET technique.

The assessment of those approaches is given.

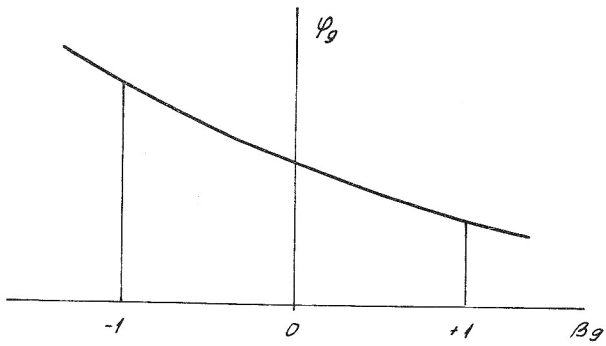
ZAVISNOST POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA OD STEPENA DEFORMACIJE U KRITIČNOJ TAČKI OBRATKA PRI SLOBODNOM SABIJANJU PARALELOPIPEDA PRIZMATIČNIM ALATOM

Mr Dragiša VILOTIĆ, asistent Fakulteta tehničkih nauka,
Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad

1. Uvod

Odredjivanje komponenata napona, odnosno pokazatelja naponskog stanja u zoni deformacije je od velikog značaja za istraživanje obradivosti hladnim zapreminskim deformisanjem.

Dijagram obradivosti (sl.1) predstavlja zavisnost graničnih deformacija ϕ_{eg} od pokazatelja naponskog stanja β, odredjuje se primenom različitih modela deformacije.



Sl. 1. Dijagram obradivosti

Veličina ϕ_{eg} predstavlja vrednost efektivne deformacije u trenutku pojave prvih vidljivih pukotina na površini uzorka, dok β-faktor predstavlja pogodnu kombinaciju napona na mestu pojave pukotina i definisan je izrazom:

$$\beta = \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{\sigma_e} = \frac{3\sigma_{sr}}{\sigma_e} \qquad (1)$$

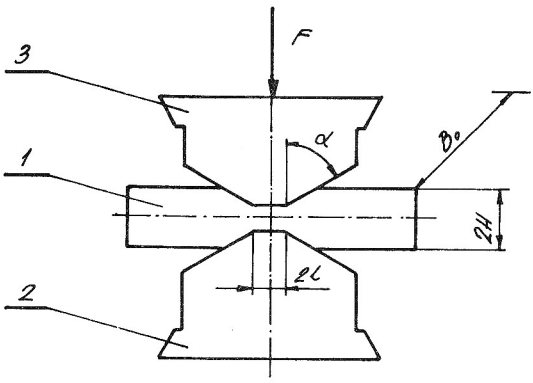
$\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ - glavni normalni naponi
σ_{sr} - hidrostatički napon
σ_e - efektivni napon.

Može se lako pokazati da jednoosnom zatezanju odgovara vrednost pokazatelja $\beta=+1$, jednoosnom sabijanju vrednost $\beta=-1$, dok se $\beta=0$ postiže kod torzije i smicanja. Na osnovu sl.1. takodje se može zaključiti da pozitivnim vrednostima β faktora (preovladjuje zatezno naponsko stanje) odgovaraju niže vrednosti graničnih deformacija odnosno da se u slučaju procesa kod kojih preovladjuje pritisno naponsko stanje ($\beta<0$) mogu ostvariti više vrednosti graničnih deformacija.

Odredjivanje pokazatelja naponskog stanja je od izuzetnog značaja kako za konstrukciju tako i za eksploataciju dijagrama obradivosti.

Različite vrednosti β-faktora odražavaju različita naponska stanja u zoni deformisanja, a posledica toga su različite vrednosti graničnih deformacija. Za definisanje položaja krive granične obradivosti (sl.1) potrebno je izabrati dovoljan broj metoda (modela) deformacije za koje je moguće precizno odrediti karakteristike naponskog i deformacionog stanja. Uobičajena metodologija definisanja krive granične obradivosti zasnovana je na ispitivanju na zatezanje ($\beta>+1$), slobodnom sabijanju cilindra ($\beta>-1$) i torziji ($\beta=0$). Na taj način u dijagramu je moguće definisati tri tačke.

Istraživanja koja su vršena u ovom radu imala su za cilj iznalaženje mogućnosti primene nekih drugih modela deformacije za definisanje krive granične obradivosti. U tu svrhu, izmedju ostalog, korišćen je model deformacije prikazan na sl.2. koji predstavlja proces slobodnog sabijanja paralelopipeda neograničene dužine prizmatičnim alatom. Uzorak 1 relativno male polazne visine i dužine B_o se postavlja na donju polovinu alata 2. Gornjim alatom 3 koji je identičan sa donjim vrši se sabijanje uzorka sve do pojave vidljivih pukotina koja odredjuje veličinu graničnih deformacija. Na osnovu geometrije alata lako se može zaključiti da u obratku u zoni deformacije vlada kombinovano naponsko stanje (zatezanje i pritisak) te se zbog toga mogu očekivati različite vrednosti pokazatelja naponskog stanja, zavisno od geometrijskih parametara uzorka i alata.



Sl. 2. Slobodno sabijanje paralelopipeda prizmatičnim alatom

2. Naponsko stanje u zoni deformacije

Za analizu naponskog stanja pri slobodnom sabijanju prizmatičnim alatom u ovom radu je korišćena metoda preseka, a na osnovu te analize prema izrazu (1) odredjene su vrednosti pokazatelja naponskog stanja β. Pri rešavanju ovog problema uvedene su odredjene pretpostavke i uprošćenja:

1. Pretpostavlja se ravansko deformaciono stanje, tj. smatra se da nema deformacije u pravcu z-ose, $\varepsilon_z=0$ (sl.3.). Uz ovakvu pretpostavku komponenta normalnog napona u pravcu z-ose jednaka je poluzbiru komponenata u pravcu ose x i u pravcu ose y, to jest:

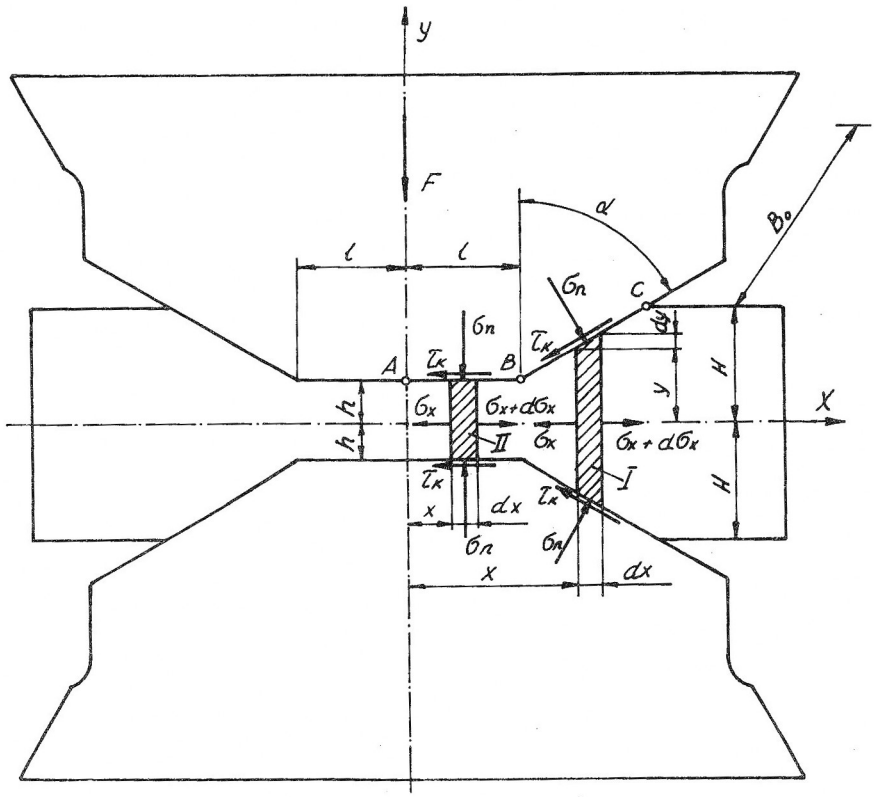
$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x+\sigma_y) \qquad (2)$$

Jednačina plastičnosti, po hipotezi najveće deformacione energije utrošene na promenu oblika, za slučaj ravanskog deformacionog stanja glasi:

$$\sigma_1-\sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\,k \qquad (3)$$

2. Pretpostavka o tangencijalnim naponima na kontaktnoj površini je usvojena u dve varijante:

- promenljivi tangencijalni napon $\tau_k=\mu\sigma_n$



Sl. 3. Komponente napona u zoni deformisanja pri slobodnom sabijanju ploče prizmatičnim alatom

- konstantni tangencijalni napon $\tau_k = mk$

gde je μ koeficijent kontaktnog trenja a m konstantni faktor smicanja, koji su medjusobno povezani relacijom:

$$m = \sqrt{3}.\mu$$

Prva varijanta za tangencijalni napon je realnija za procese hladnog deformisanja a druga za toplu obradu.

3. Pretpostavlja se konstantna vrednost specifičnog deformacionog otpora k uzduž zone deformisanja i uzima srednja vrednost:

$$k = k_{sr} = \frac{k_o + k_1}{2}$$

k_o - početni deformacioni otpor

k_1 - deformacioni otpor na kraju procesa seformisanja.

4. Pretpostavlja se da napon σ_x ne zavisi od y-ose, to jest $d\sigma_x/dy=0$.

Na osnovu sl.3. i navedenih pretpostavki postavljanjem jednačina ravnoteže može se doći do komponenata napona u zoni I i II.

1. $\tau_k=\mu\sigma_n$

Zona I

Projektovanjem svih sila u pravcu ose X dolazi se do sledeće jednačine:

$$\Sigma X_i=2(\sigma_x+d\sigma_x)(y+dy)B_o-2\sigma_x.y.B_o+2\sigma_n.\frac{dy}{\cos\alpha}.\cos\alpha.B_o-2\tau_k.$$

$$.B_o.\frac{dy}{\cos\alpha}.\sin\alpha = 0 \qquad (4)$$

Posle elementarnih transformacija dobija se jednačina:

$$\sigma_x.dy+d\sigma_x.y+\sigma_n.dy-\tau_k.dy.tg\alpha = 0 \qquad (5)$$

Uzimajući u obzir jednačinu plastičnosti koja za ovaj slučaj glasi:

$$\sigma_n+\sigma_x = 1,15.k \qquad (6)$$

dobija se:

$$\sigma_x = 1,15.k-\sigma_n$$

odnosno

$$d\sigma_x = -d\sigma_n \qquad (7)$$

Unošenjem vrednosti za σ_x i $d\sigma_x$ u jednačinu (5), uz pretpostavku $\tau_k=\mu\sigma_n$, dobija se sledeća jednačina:

$$d\sigma_n.y+\mu\sigma_n.dy.tg\alpha-1,15.k.dy = 0 \qquad (8)$$

Jednačina (8) razdvaja promenljive

$$\frac{d\sigma_n}{1,15.k-\mu.\sigma_n.tg\alpha} = \frac{dy}{y} \qquad (9)$$

a integracijom se dobija sledeće rešenje:

$$-\frac{1}{\mu.tg\alpha}.\ln(1,15.k-\mu.\sigma_n.tg\alpha) = \ln y+\ln C_1$$

to jest

$$\frac{1}{1,15.k-\mu.\sigma_n.tg\alpha} = C_1.y^{\mu tg\alpha} \qquad (10)$$

Integraciona konstanta C_1 može se odrediti iz graničnog uslova za tačku c: za $y=H_o$, $\sigma_x=0$ tj. $\sigma_n=1,15.k$. Uzimajući u obzir ove vrednosti i jednačinu (10) dobija se integraciona konstanta:

$$C_1 = \frac{H_o^{-\mu tg\alpha}}{1,15.k.(1-\mu tg\alpha)} \qquad (11)$$

Unošenjem C_1 u jednačinu (10) i rešavanjem po σ_n, dobija se konačan izraz za normalni napon u zoni I u sledećem obliku:

$$\sigma_{nI(y)} = \frac{1,15.k}{\mu.tg\alpha}\left[1-(1-\mu.tg\alpha)\left(\frac{H_o}{y}\right)^{\mu tg\alpha}\right] \qquad (12)$$

odnosno u funkciji od x:

$$\sigma_{nI(x)} = \frac{1,15.k}{\mu.tg\alpha}\left[1-(1-\mu.tg\alpha)\left(\frac{H_o}{h+(x-1)/tg\alpha}\right)^{\mu tg\alpha}\right] \qquad (13)$$

Zona II

Jednačina ravnoteže svih sila koje deluju na element II u pravcu x-ose glasi:

$$2(\sigma_x+d\sigma_x).h.B_o-2\sigma_x.h.B_o-2\tau_k.dx.B_o = 0 \qquad (14)$$

Korišćenjem pretpostavke za $\tau_k=\mu\sigma_n$ i uzimajući u obzir jednačinu plastičnosti (7), dobija se sledeća diferencijalna jednačina:

$$d\sigma_n.h+\mu.\sigma_n.dx = 0 \qquad (15)$$

čije je rešenje:

$$\sigma_{nII} = C_2.e^{-\mu\frac{x}{h}} \qquad (16)$$

Integraciona konstanta C_2 odredjuje se iz graničnog uslova za tačku B u kojoj je napon σ_n poznat i može se odrediti na osnovu izraza (12):

$$\sigma_{nB} = \frac{1,15.k}{\mu.tg\alpha}\left[1-(1-\mu.tg\alpha)\left(\frac{H}{h}\right)^{\mu tg\alpha}\right] \qquad (17)$$

Na taj način moguće je odrediti integracionu konstantu C_2:

$$C_2 = \sigma_{nB}.e^{\mu.\frac{l}{h}} \tag{18}$$

Zamenom C_2 i σ_{nB} u jednačini (16) dobija se izraz za normalni napon u zoni II:

$$\sigma_{nII(x)} = \frac{1,15.k}{\mu.tg\alpha}\left[1-(1-\mu.tg\alpha)\left(\frac{H_o}{h}\right)^{tg\alpha}\right].e^{\frac{\mu}{h}(1-x)} \tag{19}$$

Komponenta napona u pravcu x-ose i za jednu i za drugu zonu odredjuje se na osnovu jednačine plastičnosti, to jest

$$\sigma_x = 1,15.k-\sigma_n \tag{20}$$

Komponenta napona u pravcu z-ose odredjuje se poluzbirom napona σ_x i σ_n, to jest:

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x+\sigma_n) \tag{21}$$

2. $\tau_k=m.k$

Ako se u diferencijalnu jednačinu (5) unese izraz za tangencijalni napon $\tau_k=m.k$ i reši ova jednačina, dobija se izraz za normalni napon u zoni I u sledećm obliku:

$$\sigma_{nI} = k.\left[1,15-(1,15-m.tg\alpha).ln\frac{H}{y}\right] \tag{22}$$

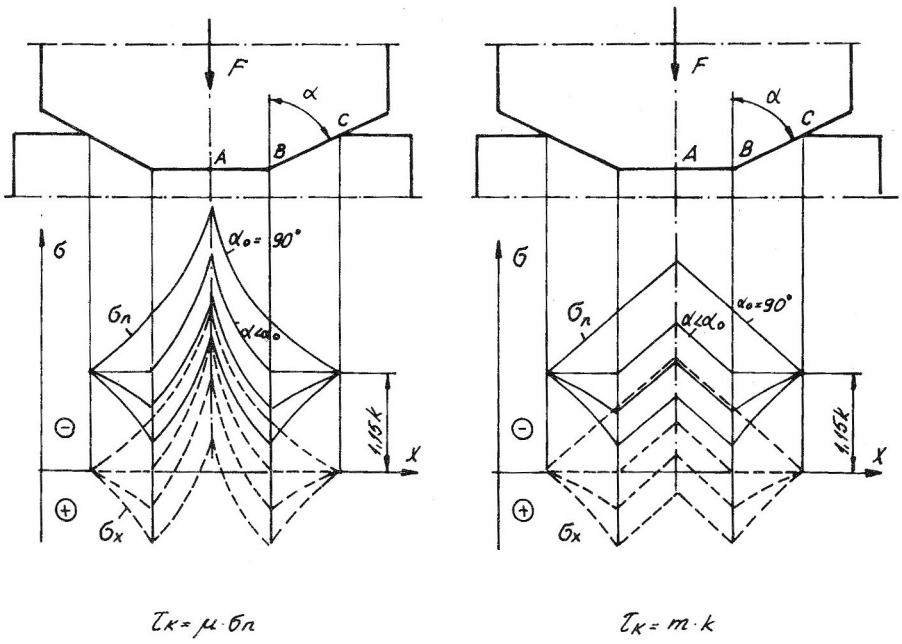
Na sličan način, korišćenjem diferencijalne jednačine (15) dolazi se do izraza za normalni napon u zoni II uz pretpostavku $\tau_k=m.k$:

$$\sigma_{nII} = \sigma_{nB} + \frac{m.k}{h}(1-x) \tag{23}$$

odnosno

$$\sigma_{nII} = k.\left[1,15-(1,15-m.tg\alpha).\phi_g\right]+\frac{m.k}{h}(1-x) \tag{24}$$

Komponente napona u pravcu ose x odredjuju se prema izrazu (20) a komponente napona u pravcu z-ose prema izrazu (21). Na slici 4. dijagramski je prikazan tok napona σ_n i σ_x za jednu i drugu pretpostavku o tangencijalnim naponima na kontaktnoj površini i za različite vrednosti ugla α. Povećanje ugla α pri istim ostalim uslovima dovodi do porasta normalnih napona tako da se u graničnom slučaju pri α=90 javlja sabija-



Sl. 4. Raspored napona u zoni deformacije kod slobodnog sabijanja prizmatičnim alatom.

nje paralelopipeda ravnim pločama. Porast koeficijenta trenja utiče takodje na porast normalnih napona, što je i razumljivo ako se ima u vidu činjenica da sa porastom koeficijenta trenja raste tangencijalni napon τ_k, odnosno smanjuje zatežući napon σ_x. Veličina ravnog dela alata 21 bitna je za raspored napona u zoni II i ne utiče na naponsko stanje u zoni I. Na osnovu slike 4 može se takodje zaključiti da pretpostavka $\tau_k=\mu\sigma_n$ daje nešto više vrednosti normalnih napona u odnosu na pretpostavku $\tau_k=m.k$.

Za istraživanje obradivosti materijala hladnim zapreminskim oblikovanjem posebno je značajno mesto nastanka pukotine. U ovom slučaju to je tačka B (sl.4.) jer je na tom mestu najveći zatežući napon, što se vidi iz dijagrama napona. S obzirom da su komponente napona za tačku B poznate, β-faktor se može odrediti prema ranijoj definiciji:

$$\beta_B = \frac{\sigma_{xB}+\sigma_{nB}+\sigma_{zB}}{\sigma_{eB}} \qquad (25)$$

Analizirajući navedeni model deformisanja (sl.2. i 3.) može se zaključiti da se naponsko stanje menja sa promenom stepena deformacije. U početnoj fazi procesa u zoni deformisanja vlada pritisno naponsko stanje izazvano dejstvom ravnog dela alata. Daljim kretanjem alata povećava se uticaj bočnih nagnutih površina alata što izaziva povećanje zatezne komponente. Ovakav trend zateznog napona zadržava se sve do kraja procesa kada dolazi do pojave pukotina i potpunog razaranja uzorka u zoni maksibalnog zatežućeg napona (tačka B, sl.3.).

Promenu naponskog stanja u zavisnosti od stepena deformacije u kritičnoj tački uzorka najpotpunije izražava zavisnost β-faktora od stepena deformacije, koja je odredjena u ovom radu.

3. Eksperimentalna istraživanja

Eksperimentalna istraživanja granice obradivosti primenom prethodnog modela deformacije vršena su na uzorcima od materijala Č 1221, sa strukturom dobijenom normalizacijom. Deformisanje uzoraka do pojave vidljivih pukotina vršeno je na hidrauličnoj presi HP-630 proizvodnje Sach and Kieselbach pomoću alata čiji je izgled dat na sl. 5.

Osnovni geometrijski parametri alata su: veličina ravnog dela $2l = 9$ mm i ugao $\alpha = 60^{\circ}$.

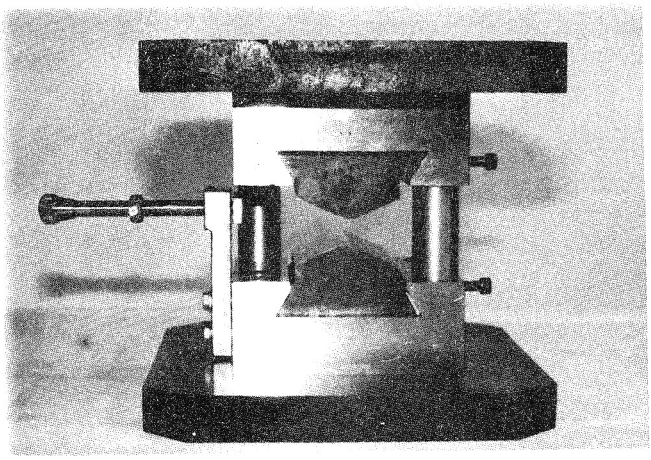
Početna visina uzorka iznosila je 13 i 18,5 mm a dužina 30 i 60 mm. Podmazivanje uzoraka je vršeno sa dva sredstva alternativno, za koja je odredjen koeficijent kontaktnog trenja po metodi slobodnog sabijanja prstena /3/. Dobijeni su sledeći rezultati:

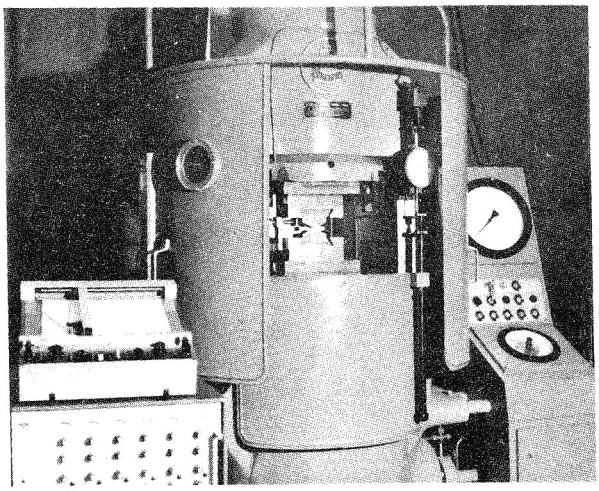
- podmazivanje mašinskim uljem $\mu = 0,13$
- fosfatirani uzorci podmazivani sa MoS_2, $\mu = 0,09$.

U procesu deformisanja kod svih uzoraka pukotine su se pojavile na mestu najvećeg zatežućeg napona (tačka B, sl. 4.).

Kriva efektivnih napona sl.6, odredjena je po metodi Rastegajeva /4/, slobodnim sabijanjem cilindra sa uduljbenjem na čeonim površinama.

Primenom izraza (13,20 i 21) odredjene su vrednosti komponenata napona σ_n, σ_x i σ_z za tačku B (sl. 3.), pri različitim vrednostima stepena deformacije visine uzorka. Zatim je na osnovu izraza (25) odredjena veličina pokazatelja naponskog stanja β. Grafički prikaz ovih rezultata dat je na sl. 7., za uzorke podmazivane mašinskim uljem. Slični rezul-

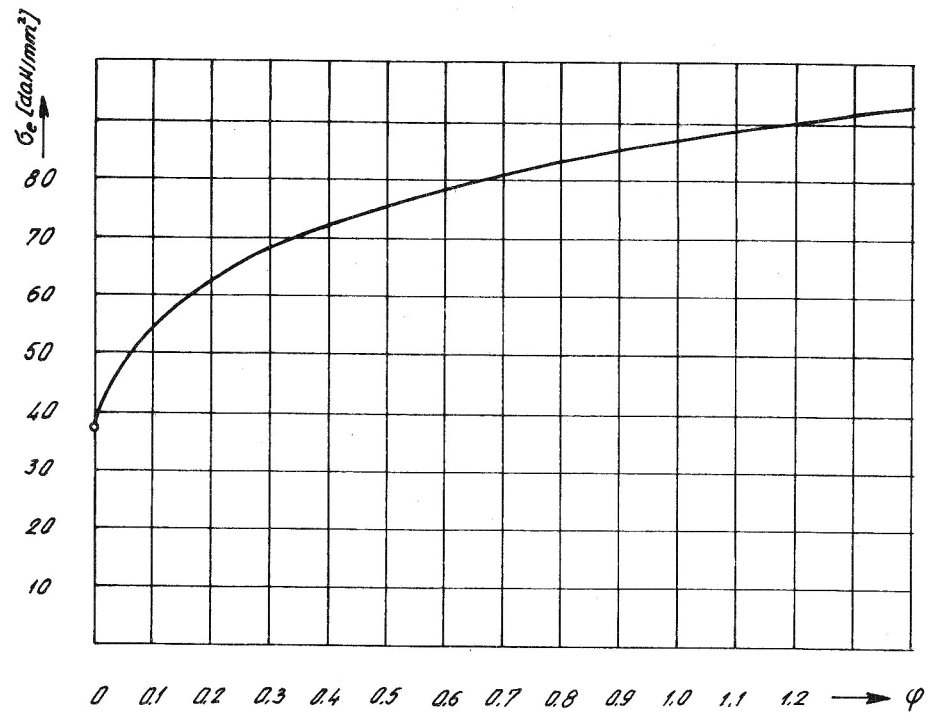




Sl. 5. Izgled alata (a) i mašine sa mernom opremom (b)

tati dobijeni su i za fosfatirane uzorke.

Dobijena zavisnost $\beta=f(\phi)$ omogućuje odredjivanje graničnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja, tj. pokazatelja naponskog stanja koji je merodavan za dijagram obradivosti β_g. Prema istraživanjima Kolmogorova /1/, kod metoda obrade sa izrazitom promenom naponskog stanja u zoni deformacije tokom procesa deformisanja pokazatelj β_m se odredjuje



Sl. 6. Kriva efektivnih napona za Č 1221.

kao srednja vrednost prema sledećem izrazu:

$$\beta_g = \frac{1}{\phi_g} \int_0^{\phi_g} \beta \cdot d\phi \qquad (26)$$

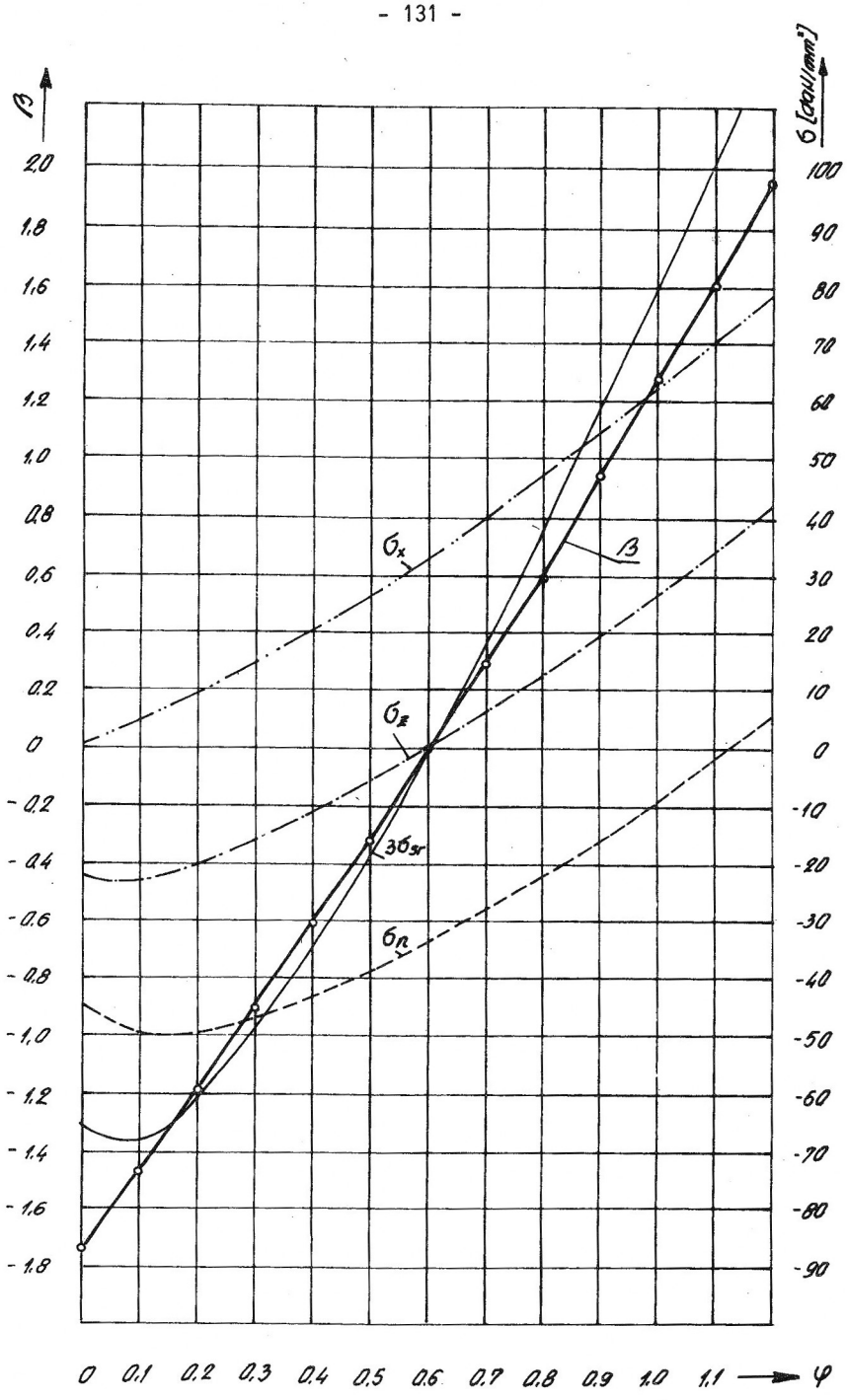
Primenom ovog izraza na dobijenu zavisnost $\beta=f(\phi)$, koja se približno može smatrati linearnom, dobija se:

$$\beta_g \simeq \frac{\beta_o+\beta_k}{2} \qquad (27)$$

β_o=1,732 - početna vrednost β-pokazatelja

β_k - vrednost β-faktora u trenutku nastajanja viljivih pukotina.

Ovakva metodologija odredjivanja graničnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja je primenjena pri istraživanju obradivosti Č 1221, uz korišćenje još nekih drugih modela deformacije.



Sl. 7. Zavisnost pokazatelja naponskog stanja od stepena deformacije

4. Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

Proces slobodnog sabijanja paralelopipeda profilisanim alatom odvija se uz veoma intenzivnu promenu naponskog stanja, odnosno β-faktora. U početnoj fazi procesa deformisanja vlada pritisno naponsko stanje ($\beta<0$), koje se porastom stepena deformacije menja usled porasta zatezne komponente napona σ_x (sl.7.). Porast pokazatelja naponskog stanja u kritčnoj tački obratka znači pogoršanje uslova deformisanja i negativno utiče na veličinu graničnih deformacija.

Izrazita nemonotonost procesa deformisanja prizmatičnim alatom /1, 2/ zahteva primenu posebne metodologije za odredjivanje graničnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_g. Prema istraživanjima Kolmogorova /1/ ova veličina se može odrediti kao srednja vrednost tokom procesa deformisanja.

Dobijena zavisnost $\beta=f(\phi)$ sa dovoljnom tačnošću se može smatrati linearnom što u konkretnom slučaju pojednostavljuje problem odredjivanja granične vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Veličina β_g se može odrediti kao srednja vrednost početne i krajnje vrednosti pokazatelja naponskog stanja.

Nulta vrednost β-faktora opisuje naponsko stanje koje odgovara smicanju, a ono je za analizirani model deformacije sa zadatom geometrijom alata ostvareno pri stepenu deformacije $\phi\cong 0{,}6$. U tom trenutku medjusobno su jednake komponente zateznog i pritisnog napona.

Prikazana metodologija odredjivanja zavisnosti pokazatelja naponskog stanja od stepena deformisanja odnosi se na najugroženiju tačku obratka (mesto nastajanja pukotina). Medjutim, prikazana metodologija je opšta i može se primeniti na ma koju tačku obratka unutar zone deformisanja.

Literatura

1. Kolmogorov,V.L.: Naprjaženija, deformacii razrušenie, Metalurgija, Moskva, 1970.
2. Smirnov-Aljajev,G.A.: Soprotivljenije metalov plastičeskomu deformirovaniju. Mašinostrojenije, Lenjingrad, 1978.

3. Shey,J.: Metal Deformation Processes: friction and lubrication.M.Deker, Inc. New York, 1972.

4. Kroha,V.A.: Krivie upručnjenija metalov pri holadnoj deformacii. Mašinostrojenije, Moskva, 1968.

5. Vilotić,D.: Prilog istraživanju uticaja naponskog stanja na obradivost čeličnih materijala hladnim zapreminskim oblikovanjem, magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1980.

Vilotić, D.

ZAVISNOST POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA OD STEPENA DEFORMACIJE U KRITIČNOJ TAČKI OBRATKA PRI SLOBODNOM SABIJANJU PARALELOPIPEDA PRIZMATIČNIM ALATOM

R e z i m e

Identifikacija komponenata naponskog stanja, odnosno pokazatelja naponskog stanja u kritičnoj tački uzorka je od velikog značaja za istraživanje obradivosti materijala hladnim zapreminskim deformisanjem.

U ovom radu prikazano je odredjivanje zavisnosti pokazatelja naponskog stanja od stepena deformacije na mestu pojave pukotine pri slobodnom sabijanju paralelopipeda profilisanim alatom. Komponente napona su odredjene metodom preseka. Istraživanja su obavljena na materijalu Č 1221. Dobijena zavisnost $\beta=f(\phi)$ može se sa dovoljnom tačnošću aproksimirati pravom linijom.

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SPANNUNGSZUSTAND UND FORMÄNDERUNGSGRAD IN DEM KRITISCHEN PUNKT BEIM STAUCHEN VON PARALLELOPIPED MIT PROFILIERTEN WERKZEUGPLATTEN

Z u s a m m e n f a s s u n g

Identifikation von Spannungskomponenten bzw. den Kennwert des Umformvermögens in dem kritischen Punkt des Werkstückes ist von grosser Bedeutung bei der Untersuchung der Umformbarkeit des Werkstoffes im kalten Zustand.

In dieser Arbeit ist die Bestimmung des Zusammenhanges zwrischen dem Umformvermögens Kennwert (β) und Formänderungsgrad (ϕ) an der Stelle des ersten Risses beim Stauchen von Parallelopiped mit profilierten Werkzeugplatten dargestellt,Spannungskomponenten sind mit Hilfe der Streifenmethode bestimmt.

Die experimentelle Untersuchung sind an dem Č 1221 durchgeführt worden. Der Zusammenhang $\beta=f(\phi)$ kann mit genügender Genauigkeit mit einer Gerade aproximierten verden.

PRILOG RAZMATRANJU PROBLEMA OBRADIVOSTI MATERIJALA PRI OBRADI VUČENJEM

Mr Ilija V,Trbojević,asistent Fakulteta tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad

1. Uvod

Glavni faktor procesa obrade vučenjem, kao i kod ostalih metoda obrade hladnim zapreminskim deformisanjem, predstavljaju svojstva materijala, čije dejstvo se izražava kroz deformacioni otpor, kao i kroz ograničenu sposobnost promene oblika zbog pojave pukotine, odnosno kidanja. Preko deformacionog otpora materijal ima direktan uticaj na ostale ograničavajuće faktore, kontaktno trenje, zagrevanje i postojanost alata, a preko njih i na troškove proizvodnje i produktivnost. Ograničena sposobnost deformisanja u jednoj operaciji utiče na povećanje broja operacija, što se takodje negativno odražava na ekonomičnost proizvodnje. Proces obrade vučenjem karakterističan je po relativno malom stepenu deformacije u jednoj operaciji, i to prvenstveno zbog zatežućeg karaktera deformacione sile (sile vučenja).

Prema tome, sa stanovišta obrade deformisanjem, mogu se istaći dva osnovna svojstva materijala i to:

- svojstvo otpornosti prema deformisanju i
- svojstvo deformabilnosti.

Na oba svojstva utiču različiti unutrašnji ili spoljni faktori. Unutrašnji faktori vezani su samo za fizičke osobine materijala, dok su spoljni definisani uslovima obrade.

Ocena pogodnosti materijala za obradu deformisanjem (ocena obradivosti) obično se izvodi na osnovu pojedinačnog razmatranja pomenutih svojstava, a često i na osnovu samo jednog od njih. Možda bi bilo korisno uvesti pokazatelj koji obuhvata oba svojstva istovremeno, npr. u vidu odnosa pokazatelja deformabilnosti i pokazatelja otpornosti, što je upravo predmet razmatranja u ovom radu.

2. Otpornost prema deformisanju

Pri deformisanju nekoliko različitih materijala do istog stepena deformacije i pri istim svim ostalim uslovima, najpogodniji za obradu biće materijal kod kog je promena oblika obavljena sa najmanjom deformacionom silom, odnosno kod kog je utrošena najmanja količina deformacionog rada. Drugim rečima, najpogodniji za obradu biće materijal sa najnižom otpornosti prema deformisanju, (sa najnižom deformacionom čvrstoćom).

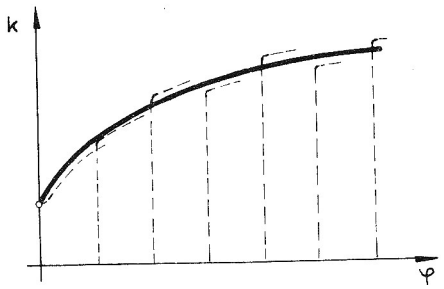
Otpornost prema deformisanju je osobina koja u opštem slučaju zavisi od hemijskog sastava materijala i strukturnog stanja (kao faktora materijala), zatim od temperature i brzine deformacije (kao spoljnih faktora).

Karakteristika na osnovu koje se može steći najbolja slika o otpornosti prema deformisanju je kriva tečenje, koja daje zavisnost napona tečenja od stepena plastične deformacije i kao takva reprezentuje faktore materijala i laboratorijske uslove temperature i brzine deformacije.

Uticaj temperature i brzine deformacije na napon tečenja kod obrade vučenjem, pri normalnim brzinama obrade, može se zanemariti.

Kriva tečenja prikazana je na sl.1 i ona se može odrediti različitim metodama. Najpogodnija je eksperimentalna metoda koja se zasniva na višestepenom redukovanju preseka postupkom vučenja i odredjivanju napona tečenja posle svakog stepena redukcije. Naponu tečenja odgovara granica ra-

zvlačenja ($k=\sigma_v$ odnosno $\sigma_{0,2}$). Pri tom treba raditi sa podjednakim stepenima deformacije, zbog negativnog uticaja neravnomernosti deformacije. Na osnovu dobijenih parova urednosti k, ϕ može se nacrtati željena kriva.



Sl.1

Kao mera otpornosti prema deformisanju može da posluži veličina napona tečenja pri odredjenim uslovima obrade. Pošto se napon tečenja menja u toku samog procesa obrade izmedju početnog (ϕ_p) i krajnjeg stepena deformacije (ϕ_k), kao mera otpornosti najbolje može da posluži srednja vrednost napona tečenja u zoni deformisanja.

Srednja vrednost napona tečenja (ili specifičnog deformacionog otpora) obično se odredjuje kao aritmetička sredina izmdeju početne $k(\phi_p)$ i krajnje vrednosti $k(\phi_k)$:

$$k_{sr}=\frac{k(\phi_p)+k(\phi_k)}{2}$$

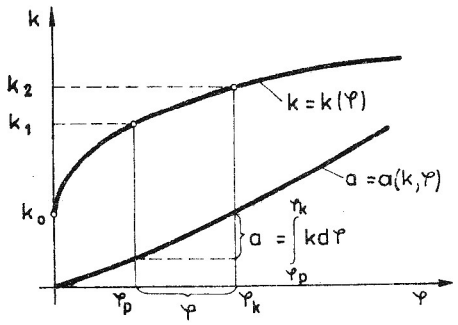
ili tačnije, preko specifičnog deformacionog rada (sl.2):

$$k_{sr}=\frac{\int_{\phi_p}^{\phi_k} k\,d\phi}{\phi_k-\phi_p}=\frac{a}{\phi}$$

gde je:

$\phi=\phi_k-\phi_p$ - stepen deformacije u datoj operaciji

a - specifični deformacioni rad u datoj operaciji.



Sl.2

3. Deformabilnost

Sposobnost materijala da trajno menja oblik bez pojave pukotine pod dejstvom spoljnih sila naziva se, u opštem slučaju, kao osobina plastičnosti. Kada se radi o deformisanju u procesu obrade, uobičajeno je da se sposobnost trajnog menjanja oblika naziva kao osobina deformabilnosti.

Ako se uzmu u razmatranje različiti materijali sa sličnim karakteristikama deformacionog otpora i deformišu pod istim uslovima do pojave pukotine, najpogodniji za obradu biće materijal kod kog se ostvari najveći stepen deformacije. Takav materijal poseduje najveću deformabilnost.

Deformabilnost u opštem slučaju zavisi od hemijskog sastava i strukturnog stanja materijala, temperature obrade, brzine deformacije, kao i od naponskog stanja u zoni deformisanja.

Pri obradi vučenjem brzina deformacije ima zanemarljivo mali uticaj na deformabilnost a isto važi i za temperaturu, s obzirom da se obrada izvodi u hladnom stanju.

Za orijentacionu i brzu ocenu deformabilnosti često se koriste različiti parametri plastičnosti, dobijeni na osnovu jednostavne probe na zatezanje i to:

- odnos napona na granici tečenja i zatezne čvrstoće ($a_\sigma = \sigma_v / \sigma_m$),
- kontrakcija preseka na mestu prekida ($\psi_p = 1 - A_p / A_o$)
- veličina maksimalne ravnomerne deformacije ($\phi_M = \ln A_M / A_o$).

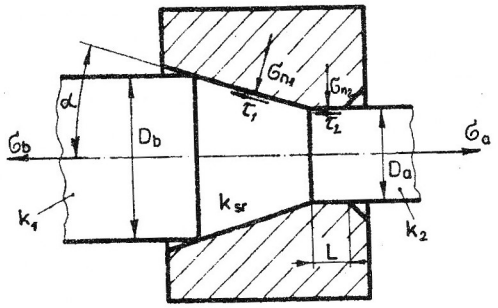
Kada je u pitanju žica, kao vučeni materijal, za ocenu

plastičnosti koriste se probe na savijanje i uvijanje do odredjenog ugla, gde se kao mera plastičnosti uzima broj savijanja, odnosno uvijanja do pucanja materijala.

Pomenuti parametri plastičnosti odredjuju se pre procesa obrade, nezavisno od dejstva spoljnih faktora, pa se zbog toga nazivaju i kao parametri sopstvene plastičnosti materijala.

Deformabilnost u procesu obrade zavisi, pored konstantnih faktora materijala, i od spoljnih faktora, koji se mogu menjati i podešavati u cilju postizanja što većeg stepena deformacije. U tom slučaju se kao mera deformabilnosti može uopšteno definisati veličina stepena deformacije koja se može ostvariti pri odredjenim karakteristikama materijala i odredjenim spoljnim faktorima obrade. Ako se zanemari uticaj temperature i brzine deformacije ostaje kao glavni spoljni faktor, preko kog se može uticati na deformabilnost, naponsko stanje u zoni deformisanja.

Naponsko stanje u zoni deformisanja definišu komponente (sl.3.):



Sl. 3.

σ_a - napon vučenja,

σ_b - napon protivzatezanja,

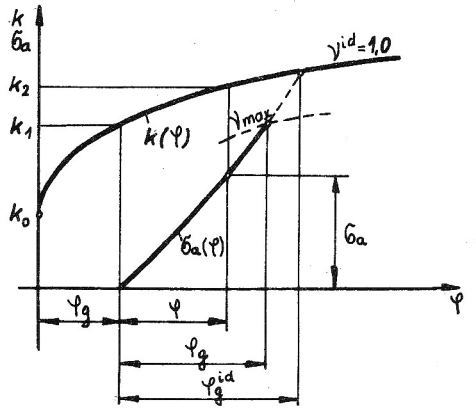
σ_{n1}, σ_{n2} - normalni naponi na kontaktnim površinama,

$\tau_1=\mu\sigma_{n1}$, $\tau_2=\mu\sigma_{n2}$ - tangencijalni naponi na kontaktnim površinama.

Napon vučenja σ_a predstavlja glavnu (aktivnu) komponentu naponskog stanja, koja deluje u najmanjem preseku vučenog ma-

terijala, savladjujući sve ostale (pasivne) komponente, i zbog toga može poslužiti kao pokazatelj ukupnog naponskog stanja. Radi lakšeg poredjenja deformabilnosti različitih materijala pogodnije je ovaj napon prikazati u relativnom obliku, pri čemu relativni napon vučenja (ν) predstavlja odnos napona vučenja σ_a i deformacionog otpora na kraju procesa deformisanja k_2 (sl.4.):

$$\nu = \frac{\sigma_a}{k_2}$$



Sl. 4.

Sada se kao pokazatelj deformabilnosti može konkretnije definisati veličina stepena deformacije koja se može ostvariti pri odredjenom relativnom naponu vučenja i odredjenim ostalim parametrima procesa obrade (karakteristika materijala (k-ϕ kriva), stepen prethodne deformacije (ϕ_p), geometrijski parametri alata (α, l_k), uslovi podmazivanja (koef.trenja μ), napon protivzatezanja (σ_b).

Najveći mogući stepen deformacije (do pojave kidanja), koji se pri nekim realnim parametrima može ostvariti, definiše granicu deformabilnosti ϕ_g, kojoj odgovara maksimalni relativni napon vučenja ν_{max} (sl.4.). Teoretski maksimalna, idealna granica deformabilnosti ϕ_g^{id} ostvarila bi se kada bi napon vučenja σ_a dostigao napon tečenja (ν^{id}=0,1). Ova vrednost

se pri realnim uslovima ne može ostvariti zbog nestabilnosti procesa podmazivanja, nehomogenosti vučenog materijala, kao i zbog negativnog uticaja neravnomernosti deformacije po preseku, koja se povećava sa porastom stepena deformacije. Zbog toga se dozvoljene vrednosti relativnog napona vučenja u praksi najčešće kreću od 0,4-0,7, u zavisnosti od vrste materijala i uslova obrade.

4. Uopšteni pokazatelj obradivosti (relativna deformabilnost)

U prethodnom izlaganju je istaknuto da pogodnost materijala za obradu raste sa povećanjem deformabilnosti a opada sa povećanjem otpornosti prema deformisanju, odnosno sa povećanjem utroška specifičnog deformacionog rada. Za upoređenje različitih materijala, kao i različitih uslova obrade, sa stanovišta pogodnosti za obradu deformisanjem, najbolje bi mogao da posluži pokazatelj koji obuhvata oba svojstva istovremeno.

U literaturi se mogu sresti slični pokazatelji koji se preporučuju za potpuniju i brzu ocenu pogodnosti materijala za deformisanje, na osnovu rezultata probe na kidanje i to:

- u vidu odnosa maksimalne ravnomerne deformacije ϕ_M i utrošenog specifičnog deformacinog rada /4/:

$$\frac{\phi_M}{a} \qquad \text{ili}$$

- u vidu odnosa ϕ_M i maksimalnog napona tečenja k_M /1/

$$\frac{\phi_M}{k_M}$$

Nedostatak ovih pokazatelja je što ne uzimaju u obzir uslove obrade. S obzirom da se proces obrade vučenjem takodje ostvaruje sa zatežućom deformacionom silom, prethodni pokazatelji poslužili su da se na sličan način definiše uopšteniji pokazatelj obradivosti u vidu odnosa mere deforma-

bilnosti i mere otpornosti prema deformisanju pri datim uslovima obrade, koji se može nazvati i kao relativna deformabilnost.

Ako se kao mera deformabilnosti usvoji veličina stepena deformacije ϕ, koja se može ostvariti sa datim karakteristikama materijala i naponskog stanja, a kao mera otpornosti odgovarajuća srednja vrednost napona tečenja k_{sr} (sl.4), tada se faktor relativne deformabilnosti K_D može napisati u obliku:

$$K_D = \frac{\phi}{k_{sr}}$$

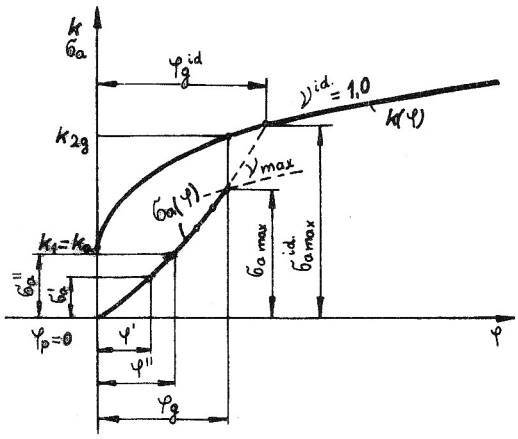
S obzirom na karakter k-ϕ krive (malom porastu k odgovara znatno veći porast ϕ) jasno je da će se faktor K_D povećavati sa porastom stepena deformacije u datoj operaciji, odnosno sa porastom deformabilnosti, koja se, u zavisnosti od parametara naponskog stanja, može povećavati samo do svoje granične vrednosti ϕ_g.

Ako se uzme da je srednja vrednost napona tečenja $k_{sr}=a/\phi$, tada se relativna deformabilnost može izraziti u obliku:

$$K_D = \frac{\phi^2}{a}$$

što znači da je njena vrednost upravo proporcionalna kvadratu pokazatelja deformabilnosti (stepena deformacije) a obrnuto proporcionalna utrošku specifičnog deformacionog rada.

Za eksperimentalno odredjivanje pokazatelja K_D radi poredjenja različitih materijala potrebno je najpre odrediti k-ϕ krivu, a zatim zavisnost napona vučenja od stepena deformacije $\sigma_a=\sigma_a(\phi)$ (sl.5). Za odredjivanje zavisnosti $\sigma_a(\phi)$ potreban je uredjaj za ostvarivanje procesa deformisanja (vučna mašina), uredjaj za merenje deformacione sile (odnosno napona vučenja), kao i odredjen broj alata (matrica) sa različitim izlaznim prečnicima. Merenje napona vučenja vrši se sa uzastopnim povećavanjem stepena deformacije sve dok se ne dostigne granica deformabilnosti ϕ_g. U tom slučaju za dati materijal i date uslove obrade najveća vrednost faktora K_D biće:



sl.5

$$K_{Dmax} = \frac{\phi_g}{k_{srg}}$$

Za eksperimentalno odredjivanje uticaja pojedinih parametara procesa obrade na relativnu deformabilnost potreban je prilično obiman eksperiment zbog velikog broja parametara. Bilo bi potrebno varirati stepen prethodne deformacije, geometrijske parametre alata, uslove podmazivanja, relativni napon vučenja, kao i napon protivzatezanja.

Zbog ovako velikog broja parametara, analizu njihovog uticaja bilo bi lakše izvršiti matematički. Za ovu svrhu potrebno je k-ϕ krivu izraziti u odgovarajućem analitičkom obliku i definisati funkciju pokazatelja deformabilnosti ϕ u zavisnosti od svih nabrojanih uticajnih parametara:

$$\phi = \phi(\nu, k(\phi), \phi_p, \alpha, l_k, \sigma_b, u)$$

Problem odredjivanja funkcije pokazatelja deformabilnosti i njenog rešavanja, sa ciljem kompleksnije analize uticaja pojedinih parametara na proces obrade vučenjem, predmet su jednog posebnog razmatranja.

5. Zaključak

Na kraju se može zaključiti da je pogodnost materijala za obradu vučenjem (ili kraće obradivost) direktno zavisna od svojstva deformabilnosti i svojstva otpornosti prema deformisanju.

Pokazatelj obradivosti definisan je odnosom pokazatelja deformabilnosti i pokazatelja otpornosti prema deformisanju.

Pri odredjenim parametrima materijala, obradivost se može poboljšati povećanjem deformabilnosti, na koju se može uticati jedino preko parametara naponskog stanja.

S obzirom na veliki broj parametara, kompleksna analiza njihovog uticaja na obradivost najlakše se može izvršiti matematički za čega je neophodno definisati funkciju pokazatelja deformabilnosti:

$$\phi = \phi(\nu, k(\phi), \phi_p \alpha, l_k, \sigma_b, \mu)$$

dok se uticaj temperature i brzine deformacije pri normalnim uslovima obrade može zanemariti.

L i t e r a t u r a

1. Stenger H.: Bedeutung des Formänderungsvermögens für die Umformung, Draht Welt, Nr 12/1967.
2. Zünkler B.: Berechnung der Kräfte und der Formänderungen beim Drahtziehen ausgehend von der Fliesskurve der Werkstoffes, Draht, Nr 11/1969.
3. Vujović V.: Istraživenje uticaja različitih stanja jednog domaćeg čelika na obradivost hladnim zapreminskim oblikovanjem, Novi Sad, 1976.
4. Devedžić B.: Osnovi teorije plastičnog deformisanja materijala, Kragujevac, 1975.
5. Backofen W.: Deformation processing, Massachusets, 1972.
6. Avitzur B.: Metal forming - Processes and analysis, New York, 1968.
7. Trbojević I.: Prilog istraživanju optimalnih geometrijskih parametara konusno-konvergentnog alata za obradu metala vučenjem, magistarski rad, Novi Sad, 1981.

Trbojević, V.I.

PRILOG RASMATRANJU PROBLEMA OBRADIVOSTI MATERIJALA PRI OBRADI VUČENJEM

R e z i m e

Pogodnost materijala za obradu vučenjem (obradivost) zavisi od svojstva otpornosti prema deformisanju i svojstva deformabilnosti. U radu se razmatra mogućnost ocene obradivosti na osnovu jednog pokazatelja, koji obuhvata oba svojstva istovremeno, izraženog količnikom pokazatelja deformabilnosti pri datim uslovima obrade i pokazatelja otpornosti prema deformisanju. Povećanje pogodnosti za obradu odredjenog materijala može se ostvariti povećanjem deformabilnosti, na koju se može uticati jedino podešavanjem parametara naponskog stanja u zoni deformisanja.

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES UMFORMBARKEITSPROBLEMS BEIM DRAHTZIEHEN

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Eigung des Werkstoffes für Drahtziehen (Umformbarkeit) ist von Materialwiderstand gegen plastische Formänderung und von Umformbarkeitseigenschaften abhängig. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit der Beurteilung der Umformbarkeit auf Grund eines Kennwertes analysiert. Dieser Kennwert beinhaltet beide Eigenschaften gleichzeitig und wird als Qvotient zwischen dem Umformbarkeitkennwert bei gegebenen Arbeitsbedingungen und dem Materialwiderstandskennwert definiert.

Die Eignung für die Bearbeitung kann durch die Erhöung der Umformbarkeit erreicht werden. Diese Umformbarkeit kann nur durch die bestimmte Einstellung der Spannungskomponenten in der Umformzone beinflusst werden.

EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UTICAJA KOTVE NA STATIČKU KRUTOST MEHANIČKE PRESE OTVORENOG TIPA

Mr Edhem M. ŠEHOVIĆ, dipl.ing., glavni projektant u Tvornici strojeva „Jelšingrad", B. Luka

1. Uvod

Pri projektovanju mašine projektantu se nameće čitav niz problema koje treba riješiti: tačnost, produktivnost, snaga, dimenzije, estetika, cijena izrade, itd.

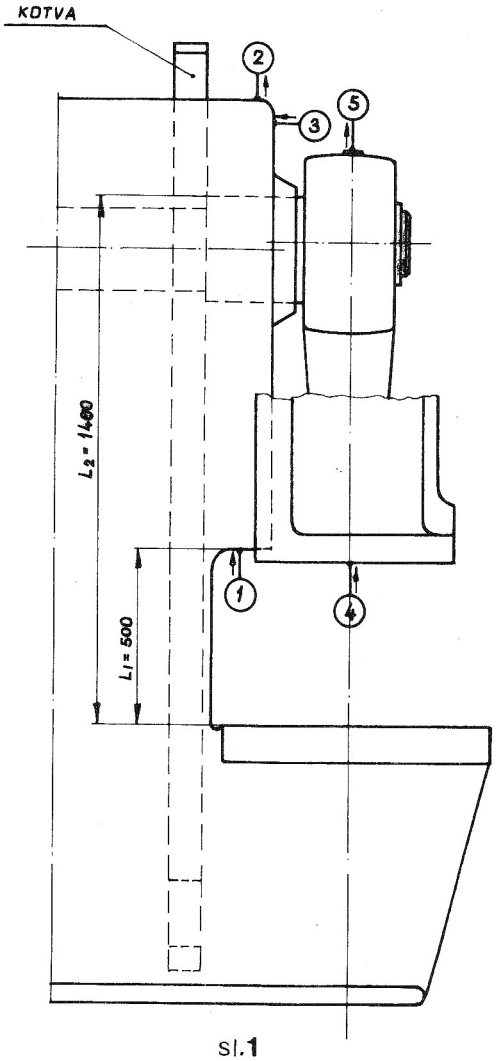
Kako tačnost prese otvorenog tipa neposredno zavisi od krutosti tijela[1], kao najuticajnijeg elementa u nizu elemenata, potrebno je posebno voditi računa o krutosti tijela.

Pošto se samo povećanjem površina presjeka i izborom materijala ne može riješiti ovaj problem (zbog težnje ka uštedi u prostoru i materijalu, a ni estetika se ne smije zanemariti), potrebno je koristiti i ostale raspoložive mogućnosti: bolji raspored kritičnih površina presjeka, ukrućivanje prednaprezanjem, i sl.

2. Ukrućivanje tijela prednaprezanjem

Tijelo prese otvorenog tipa ukrućuje se prednaprezanjem na dva načina:

- prednaprezanjem tijela pomoću kotve u stubovima (sl. 1);
- prednaprezanjem tijela vijcima na samom prepustu stola.



Sl.1

Prvi način se izvodi zagrijavanjem kotve i postavljanjem odgovarajućih podloški, a drugi način zagrijavanjem vijaka i navrtanjem navrtki na potrebnu mjeru. Pri hladjenju kotve, odnosno vijaka, nastaje prednaprezanje tijela. U oba slučaja završna obrada tijela se vrši poslije prednaprezanja.

Prednaprezanjem pomoću vijaka (na prepustu stola), svakako, postiže se veći efekat, ali se time tijelo „zatvara", čime se smanjuje radni prostor stola.

U ovom radu biće razmatran uticaj kotve na statičku krutost jedne od presa (nazivne sile 1.250 kN) iz proizvodnog programa Tvornice strojeva „Jelšingrad" - Banja Luka.

Familija presa je formirana prema nominalnim silama standardnog reda: 250, 320, 500, 630, 1.000, 1.250 kN, itd., pri čemu se po dva tipa presa bližih nominalnih sila (250 i 320, 500 i 630, 1.000 i 1.250 kN, itd.) sastoje od istih dijelova, s tim što se tijelo za presu veće nominalne sile ukrućuje prednaprezanjem pomoću kotve. Na taj način povećanje ukupne krutosti prese zavisi samo od povećanja krutosti tijela, dok su parcijalne krutosti ostalih dijelova (vratila, ojnice, pritiskivača, itd.) ostale iste. Dijelovi koji se ne ukrućuju dimenzionisani su prema većoj nominalnoj sili, tako da zadovoljavaju za obje prese.

3. Odredjivanje deformacija

Da bi se mogao odrediti uticaj kotve na povećanje krutosti tijela, odnosno prese, potrebno je mjeriti elastične deformacije obje prese pri istom opterećenju.

U ovom slučaju vršeno je odredjivanje razlike deformacija presa od 1.000 i 1.250 kN, do nominalne sile prve prese. Na sl. 1 naznačena su mjerna mjesta (1...5) koja su dovoljna za definisanje ovog uticaja, kao i položaj kotve u tijelu. U tabeli 1 date su vrijednosti izmjerenih veličina pomjeranja za obje prese [2], a na sl. 2 i 3 dijagramski prikaz pomjeranja, odnosno deformacija i zazora.

4. Analiza rezultata

Pomjeranja tačaka 1 i 2 (koja su ujedno i deformacije) zavise od dužina L_1 i L_2, pa je za očekivati da pomjeranje tačke 2 bude veće.

Tabela 1

Mjerna mjesta	Pomjeranja (mm/loo)				
	Opterećenje (kN)				
	250	500	750	1000	1250
1	12	25	36	5o	
	1o	2o	31	42	53
2	18	37	55	75	
	12	24	38	52	65
3	38	75	115	153	
	34	67	1o3	135	17o
4	11o	16o	213	263	
	1o2	145	19o	236	283
5	77	116	154	192	
	7o	1o2	136	168	2oo

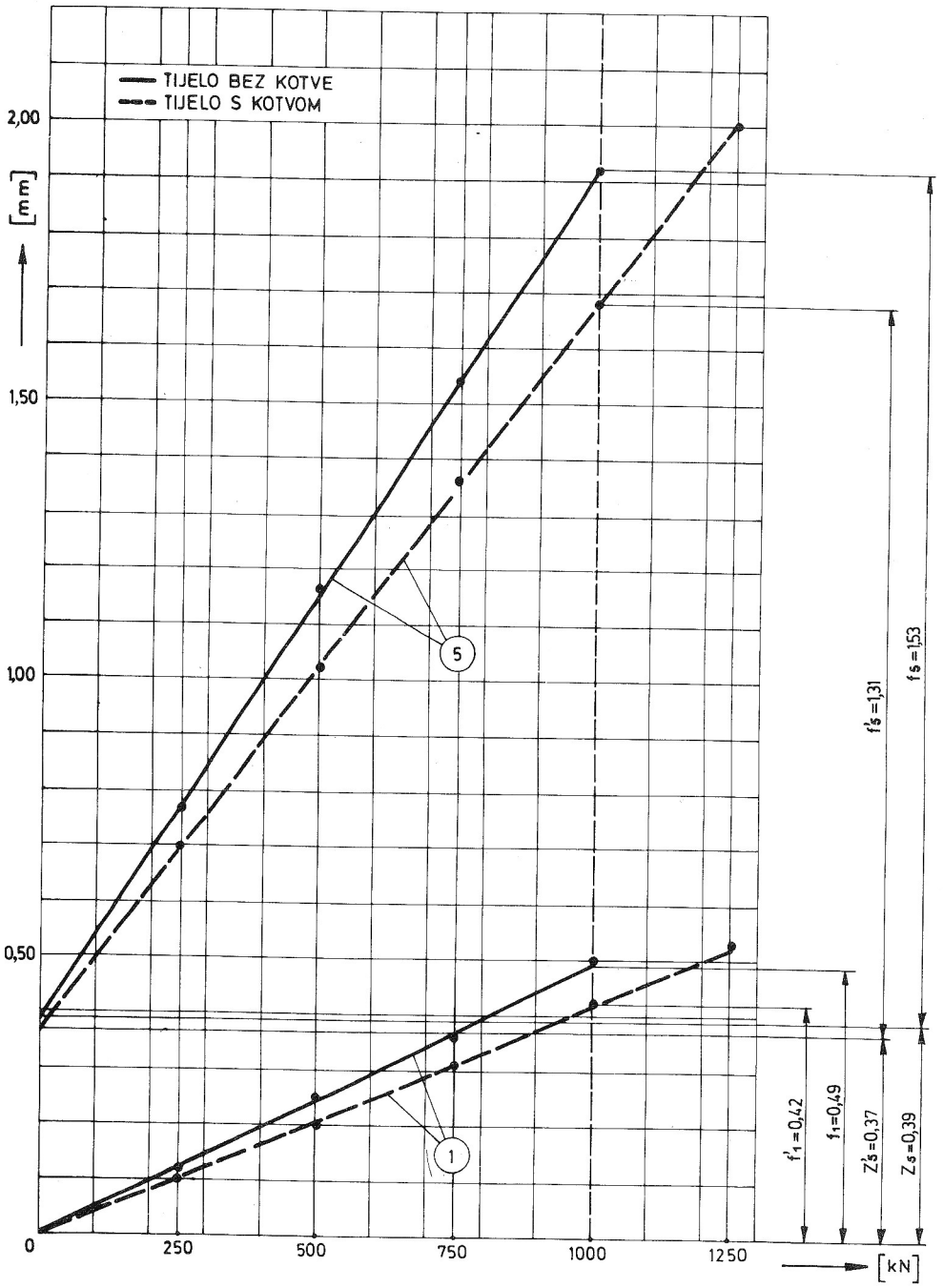
Ako uporedimo pomjeranja (pri sili od 1.ooo kN) f_1 i f_2 za presu bez kotve, kao i f_1' i f_2' za presu sa kotvom, te odnose prema dužinama L_1 i L_2, može se uočiti slijedeće:

- pomjeranje mjerne tačke 1, u oba slučaja, je relativno veće od pomjeranja mjerne tačke 2, što je razumljivo (presjek je slabiji na dužini L_1);

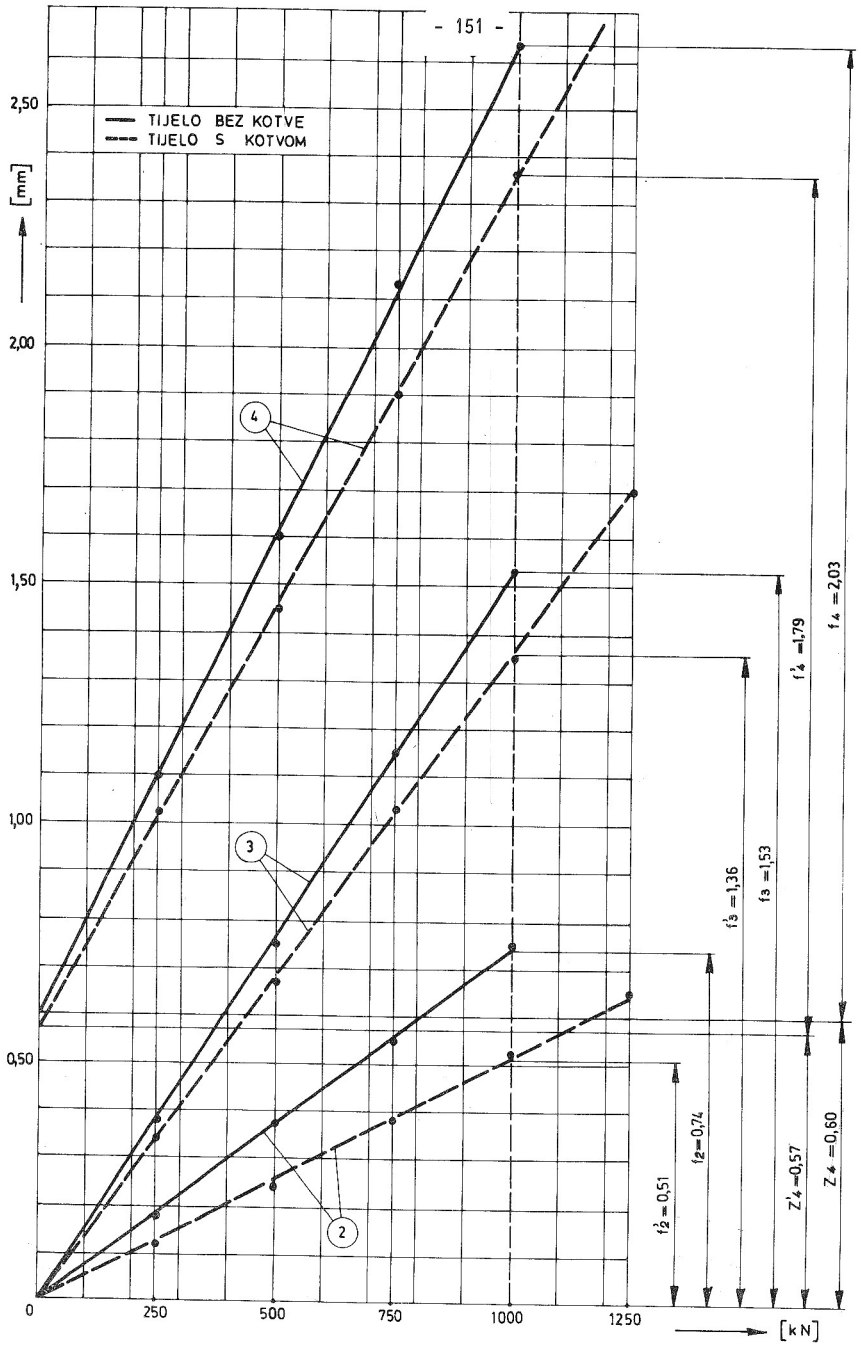
- kod tijela sa kotvom znatno je smanjena razlika pomjeranja u odnosu na tijelo bez kotve ($f_2 - f_1 = 0,74 - 0,49 = 0,25$ mm; $f_2' - f_1' = 0,51 - 0,42 = 0,09$ mm), pri čemu se ukrućenje više odrazilo na mjernu tačku 2.

Ukrućenje tačaka 1 i 2 u procentima:

$$\triangle f_1 = \frac{f_1 - f_1'}{f_1} \cdot 1oo = \frac{o,49 - o,42}{o,49} \cdot 1oo = 14,3\ \% \qquad (1)$$


TIJELO BEZ KOTVE
TIJELO S KOTVOM
2,00
1,50
1,00
0,50
0
[mm]
250
500
750
1000
1250
[kN]
5
1
f's=1,31
fs=1,53
f'1=0,42
f1=0,49
Z's=0,37
Zs=0,39

Sl.2


TIJELO BEZ KOTVE
TIJELO S KOTVOM
[mm]
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0
250
500
750
1000
1250
[kN]
4
3
2
f4 =2,03
f'4 =1,79
f3 =1,53
f'3 =1,36
f2=0,74
f'2 =0,51
Z4 =0,80
Z'4 =0,57

sl.3

$$\Delta f_2 = \frac{f_2 - f_2'}{f_2} \cdot 100 = \frac{0,74 - 0,51}{0,74} \cdot 100 = 31,1\ \% \qquad (2)$$

Ukrućenje prese u mjernoj tački 3 (u horizontalnom pravcu) iziznosi:

$$\Delta f_3 = \frac{f_3 - f_3'}{f_3} \cdot 100 = \frac{1,53 - 1,36}{1,53} \cdot 100 = 11,1\ \% \qquad (3)$$

Ukrućenje na mjernim tačkama 4 i 5 zavisi od ukrućenja tačke 2. Razlika pomjeranja tačaka 4 i 5 na presama bez kotve i sa kotvom treba da odgovara razlici pomjeranja tačke 2:

$$f_2 - f_2' = 0,74 - 0,51 = 0,23 \text{ mm} \qquad (4)$$

$$f_4 - f_4' = 2,03 - 1,79 = 0,24 \text{ mm} \qquad (5)$$

$$f_5 - f_5' = 1,53 - 1,31 = 0,22 \text{ mm} \qquad (6)$$

Razlika je neznatna, a nastaje zbog razlike u očitavanju vrijednosti na manometru i komparatorima (pri opterećenju prese).

Povećanje ukrućenja tačaka 4 i 5 u procentima:

$$\Delta f_4 = \frac{f_4 - f_4'}{f_4} \cdot 100 = \frac{2,03 - 1,79}{2,03} \cdot 100 = 11,7\ \% \qquad (7)$$

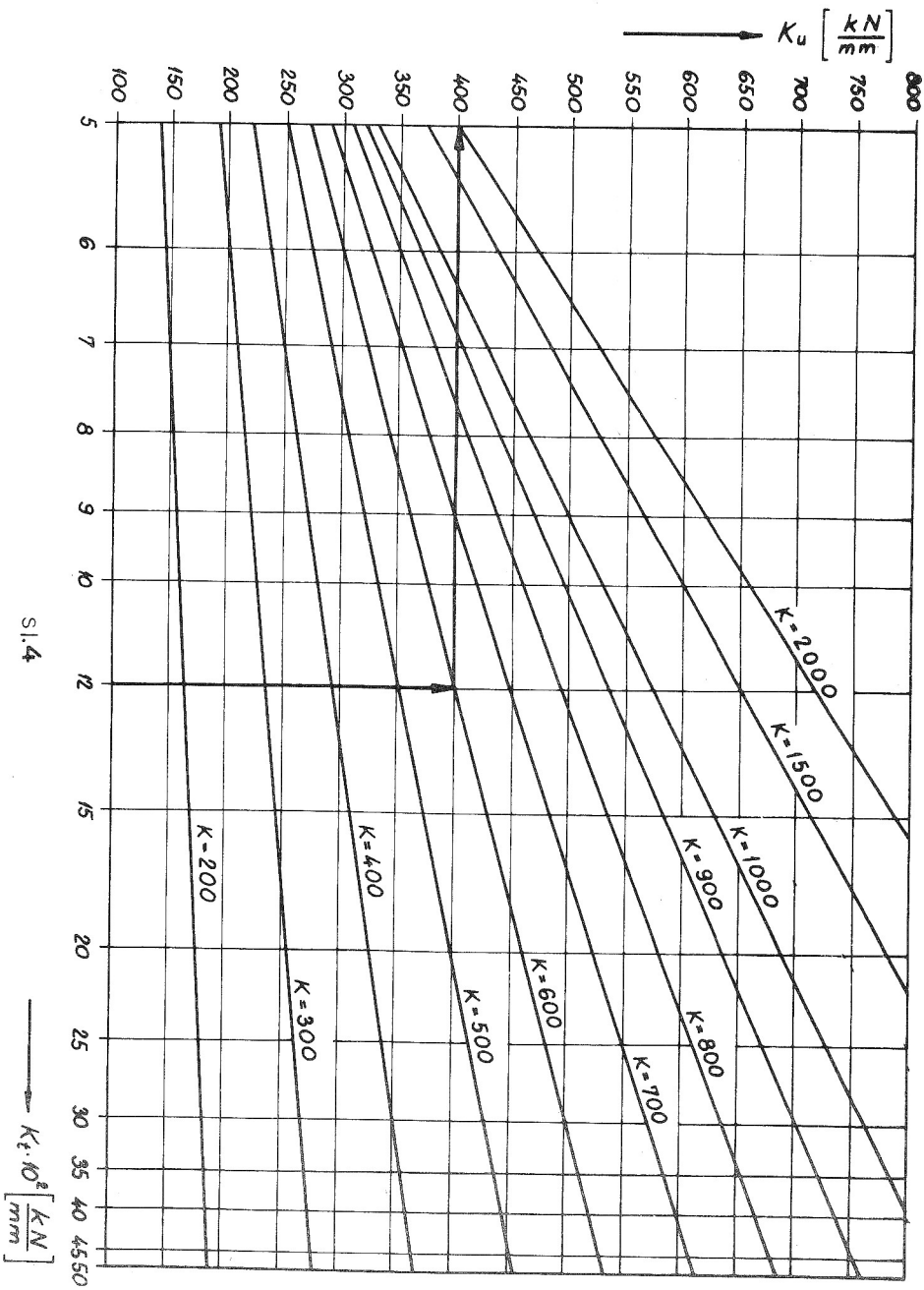
$$\Delta f_5 = \frac{f_5 - f_5'}{f_5} \cdot 100 = \frac{1,53 - 1,31}{1,53} \cdot 100 = 15\ \% \qquad (8)$$

Uočljivo je da je uticaj povećanja krutosti tijela na tačku 5 veći nego na tačku 4 (koja je ujedno mjerodavna za definisanje ukupne krutosti - krutosti prese). To je i razumljivo, jer povećanjem samo jedne parcijalne krutosti, manje se odražava na većem broju elemenata, u ovom slučaju na ukupnu krutost.

To se može vidjeti i iz analitičkog odnosa, gdje je zbir recipročnih vrijednosti parcijalnih krutosti u rednoj vezi jednak recipročnoj vrijednosti ukupne krutosti, tj.:

$$\frac{1}{K_u} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \cdots = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{K_i} \qquad (9)$$

Kako je samo jedna parcijalna krutost izmijenjena (krutost tijela), a ostale krutosti (vratila, ojnice i pritiskivača) su ostale iste, izraz (9) se može pisati u obliku:


$K_u \left[\frac{kN}{m}\right]$
800
750
700
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
K=2000
K=1500
K=1000
K=900
K=800
K=700
K=600
K=500
K=400
K=300
K=200
5
6
7
8
9
10
12
15
20
25
30
35
40
45
50
$K_t \cdot 10^2 \left[\frac{kN}{mm}\right]$

Sl.4

$$\frac{1}{K_u} = \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K} = \frac{K_t + K}{K_t \cdot K} \qquad (10)$$

gdje su:

K_u - ukupna krutost (krutost prese);

K_t - krutost tijela;

K - krutost ostalih dijelova prese (vratila, ojnice i pritiskivača):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_v} + \frac{1}{K_o} + \frac{1}{K_p} \qquad (11)$$

Prema jed. (10) dalje slijedi:

$$K_u = \frac{K_t \cdot K}{K_t + K} = \frac{K}{1 + K/K_t} \qquad (12)$$

Iz jed. (12) se vidi da K_u raste sa povećanjem K_t i obrnuto, pri K = konst., ali da ne postoji linearna zavisnost.

Takodje je uočljivo da K_u raste ili opada pri povećanju ili smanjenju K, pa je moguće krutosti pojedinih dijelova mijenjati na račun drugih, kao i krutost cijele prese. Zavisnost veličina K_u, K_t i K (prema jed. 12) data je nomogramom (sl. 4).

Deformacija vratila u oba slučaja treba da bude ista:

$$f_v = f_5 - f_2 = 1{,}53 - 0{,}74 = 0{,}79 \text{ mm} \qquad (13)$$

$$f'_v = f'_5 - f'_2 = 1{,}31 - 0{,}51 = 0{,}80 \text{ mm} \qquad (14)$$

Ukupni (sklopni) zazori u ove dvije prese ($z_4 = z_u$ i $z'_4 = z'_u$), kao i zazori podsklopova (z_5 i z'_5), razlikuju se, što je rezultat odstupanja mjera pri izradi dijelova (tolerancije).

5. Zaključak

Na osnovi izloženog može se zaključiti slijedeće:

1. Krutost tijela prese otvorenog tipa moguće je povećati pomoću kotve toliko da ukupna krutost prese bude u skladu sa povećanjem nominalne sile.

2. Korišćenjem kotve postiže se znatna ušteda u materijalu i prostoru, a samim tim i u estetici.

3. Ukrućenjem tijela prese pomoću ovakve kotve ne smanjuje se radni prostor, za razliku od presa koje se ukrućuju vijcima na samom prepustu stola.

4. Značajno je napomenuti da se ovim postupkom smanjuje cijena izrade, jer se za oba tipa presa koristi ista tehnička dokumentacija, kao i modeli za odljevke, osnovna sredstva, itd.

Literatura

[1] ŠEHOVIĆ M.E., Eksperimentalna identifikacija statičke krutosti univerzalne ekscentarske prese EPU 100, Obrada deformisanjem u mašinstvu, br. 2, Novi Sad, 1976.

[2] ŠEHOVIĆ M. E., Elaborati prototipskog ispitivanja presa u Tvornici strojeva „Jelšingrad", Banja Luka.

ŠEHOVIĆ M.E.

EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UTICAJA KOTVE NA STATIČKU KRUTOST MEHANIČKE PRESE OTVORENOG TIPA

R e z i m e

U radu je prikazan način izrade dva bliska tipa mehaničkih presa otvorenog tipa korišćenjem istih dijelova, uz ukrućenje samo tijela, kao najvećeg i najuticajnijeg dijela.

Dat je osvrt na opravdanost ovog postupka u cilju sniženja cijene izrade, pri čemu značajni parametri prese ostaju u granicama dozvoljenih vrijednosti.

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF ARMATURE IMPACT ON STATIC RIGIDITY OF OPEN TYPE POWER PRESS

S u m m a r y

The work describes producing way of two close types of open power presses by using the same parts, and making rigid olny the body as the biggest and most influential part.

The consideration is given about usefulness of the method with the aim to reduce the manufacturing cost, while the important press parameters stay within the limits of allowable values.

Institut za proizvodno mašinstvo u Novom Sadu
LABORATORIJA ZA OBRADU DEFORMISANJEM

MEDJUNARODNA SARADNJA SAD - JUGOSLAVIJA

Započet je rad na zajedničkom naučnoistraživačkom projektu pod naslovom:

"ISTRAŽIVANJE ODNOSA OBRADNOG SISTEMA I OBRADIVOSTI MATERIJALA U PROCESIMA OBRADE METALA DEFORMISANJEM"

Nosioci projekta su sa jugoslovenske strane Institut za proizvodno mašinstvo i Dr Vlado Vujović iz Novog Sada, a sa strane Sjedinjenih američkih država Kalifornijski Institut iz Los Andjelosa i Dr Shabaik. Finansiranje rada na projektu je 50% sa jugoslovenske strane i 50% sa strane SAD preko fondacije NSF.

Posle višegodišnje procedure u vezi predlaganja i usvajanja naučnoistraživačkih projekata sa zajedničkom obradom i finansiranjem, konačno je u zadnjem kvartalu 1981. godine potpisan ugovor na osnovu koga je prihvaćena zajednička obrada i finansiranje petogodišnjeg projekta pod naznačenim naslovom. Za prvu godinu rada doznačena su sredstva Institutu za proizvodno mašinstvo u Novom Sadu u iznosu od 600.000.- dinara.

Predvidjen je dolazak Prof. Shabaika u Jugoslaviju u martu mesecu 1982. godine a odlazak Prof. Vujovića u Kalifornijski Institut u šestom mesecu 1982. godine u vezi obrade predmetnog projekta. Ukoliko postoje posebni interesi za razgovore sa poznatim američkim Prof.Shabaikom, odnosno interesi za njegovu posetu molimo da se zainteresovani obrate na Laboratoriju za obradu deformisanjem u Novom Sadu, kako bi se programirao i taj deo boravka Prof. Shabaika.

Mašinski fakultet u Nišu
KATEDRA ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO

I N F O R M A C I J A

O NAUČNOM RADU, NASTAVI, PRIMENI ZNANJA I KAPACITETNIM KARAKTERISTIKAMA

1. OSNIVANJE I RAZVOJ KATEDRE ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO

Katedra za proizvodno mašinstvo osnovana je na Mašinskom odseku Tehničkog fakulteta Univerziteta u Nišu 1966. godine. U okviru nje formirane su i dve laboratorije, i to:

- Laboratorija za mašinsku obradu i mašine alatke i
- Laboratorija za mašinske materijale,

sa veoma skromnom opremom za - isključivo - vizuelno prikazivanje studentima mašina i uredjaja, koji su bili zastarelog tipa i dobrim delom u neispravnom stanju.

U to vreme, u okviru Katedre su postojali sledeći predmeti: tehnologija materijala, mašinska obrada i mašine alatke, obrada materijala, tehnološki sistemi i kontrola i konstrukcija alata i pribora. Vežbe su bile auditivne.

Osnovna delatnost Katedre, u to vreme, je bila usmerena u pravcu organizovanja i održavanja nastave.

Njen kadrovski sastav pri osnivanju je bio:

- Predrag Popović, dipl.ing.maš., docent, šef Katedre;
- Božidar Mitić, dipl.ing.maš., predavač i
- Dobroslav Stanković, dipl.ing.metal., asistent.

Značajni korak u razvoju Katedre je učinjen formiranjem Mašinskog fakulteta u Nišu 1. oktobra 1971. godine, što se vidi iz sledećeg, i to:

1. Postavljen je novi nastavni plan i program u daleko širem obimu, koji je odgovarao novoosnovanom smeru proizvodnog mašinstva sa akcentom na obradi deformisanjem, a što se vidi iz datog pregleda:

Red. broj	Naziv predmeta	Semestar: III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1.	Mašinski materijali	2+2	3+2					
2.	Mašinska obrada					2+2	2+2	
3.	Obrada plast.deform.					3+2	1+2	
4.	Obrada rezanjem					2+0	1+2	
5.	Mašine za obr.defor.						1+1	3+3

	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
6. Mašine za ob.rez.						2+0	1+2
7. Tehn.sist. i kon.						1+1	3+2
8. Konstrukcija alata						2+2	2+2
9. Automat.proizvodnj.						3+1	

2. Organizovane su poslediplomske studije iz oblasti proizvodnog mašinstva - domen obrade materijala deformisanjem - sa predmetima:

   - Odabrana poglavlja iz matematike.
   - Elastodinamika sa teorijom plastičnosti.
   - Metrologija.
   - Mehanizmi i dinamika mašina.
   - Teorija obrade deformisanjem.
   - Teorija mašina za obradu deformisanjem.

   Poslediplomske studije su bile organizovane na mentorskom principu.

3. Od tada se pristupa organizovanim istraživačkim zahvatima sa intenzivnim opremanjem i osposobljavanjem laboratorija za eksperimentalna istraživanja i ispitivanja.

4. Kadrovski razvoj Katedre,u periodu 1966. - 1981. godine, dat je tabelarno.

Zvanje	Godina 19..															
	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
Red. profesor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	2
Van. profesor				1	1	2	2	2	1	-	1	1	2	2	2	2
Docent	1	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3
Predavač	1	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
Asistent	1	-	-	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	2
Asist.-pripravnik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	5	5	6	7
Laborant	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
UKUPNO:	5	5	5	6	7	12	12	12	11	13	13	12	16	16	17	18
Nastavnika	2	3	3	3	3	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	7
Saradnika	1	-	-	1	2	4	4	4	4	6	6	5	8	8	9	9

Naučna zvanja	Dr	-	1	1	1	1	-	1	1	1	2	2	3	4	4	4	7
	Mr	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	3	4	4	4	5

NAPOMENA: - Prof. dr Miroslav Pavlović otišao sa Katedre 1971.g.
- Doc. Božidar Mitić umro 1978. godine.

2. NAUČNOISTRAŽIVAČKI RAD

Naučnoistraživačka delatnost Katedre za proizvodno mašinstvo odvijala se u realizaciji naučno-istraživačkih projekata, koje su finansirali ili finansiraju:

- Republička zajednica nauke Srbije;
- Osnovna zajednica nauke Regiona Niša;
- Fond za nauku Opštine Niša;
- Fond za naučni rad Univerziteta u Nišu i
- Privredne organizacije: MIN-Niš, EI+Niš, "Djuro Salaj"-Niš, Zavodo "Crvena Zastava"-Kragujevac, Metalurški kombinat "Smederevo"-Smederevo, Fabrika mašina "ILR"-Železnik, "Sarlah" Pirot, "Lemind"-Leskovac, i dr.

Realizovani su sledeći naučnoistraživački projekti, i to:

2.1. Istraživanja na polju osvajanja tehnologije izrade predmeta rada metodom izvlačenja nestišljivim fluidom. Period istraživanja 1971.-1977. godina. Rukovodilac prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Republička zajednica nauke Srbije, Fond za naučni rad i razvoj kadrova Skupštine opštine iz Niša,MIN-Niš i EI-Niš. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.2. Oscilovanje obradnog sistema pri obradi materijala deformisanjem i identifikacija fenomena koji utiču na njegove eksploatacione i konstruktivne karakteristike. Period istraživanja: 1972.-1977. godina. Rukovodilac: prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Republička zajednica nauke Srbije, Fond za naučni rad Univerziteta u Nišu i MIN iz Niša. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.3. Razvoj teorije i savremenih metoda projektovanja i proračuna sredstava za obradu materijala deformisanjem. Period istraživanja: 1976.-1978. godina. Rukovodilac: prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Republička zajednica n-

auke Srbije, MIN-Niš i EI-Niš. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.4. Istraživanje i razvoj metoda projektovanja i proračuna savremenih sredstava i metoda obrade materijala deformisanjem sa istraživanjima obradivosti domaćih materijala zaključno do verifikacije u eksploataciji. Period istraživanja: 1976.-1980. godina. Rukovodilac: prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Republička zajednica nauke Srbije, MIN-NIŠ, EI-Niš, Zavodi "Crvena zastava" iz Kragujevca i Metalurški kombinat "Smederevo" iz Smederevа. Realizatori: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu (nosilac projekta), Mašinski fakultet u Kragujevcu, Institut "Kirilo Savić" - OOUR institut za automatiku iz Beograda, Institut za ispitivanje materijala Srbije - Centar za metale u Beogradu i Institut Elektronske industrije u Nišu.

2.5. Problemi analize tehnoloških procesa proizvodnje i pravci njihovog rešavanja. Period istraživanja: 1976.-1978. godina. Rukovodilac: prof. dr Aleksandar Pavlović. Finansijeri: Republička zajednica nauke Srbije i MIN-Niš. Realizatori: Institut "Kirilo Savić"-OOUR železnički institut u Beogradu (nosilac projekta) i Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.6. Istraživanje i razvoj metoda oblikovanja lima deformisanjem i presovanje profila uz korišćenje maksimalne obradivosti. Period istraživanja: 1979.-1980. godina. Rukovodilac: Doc. dr Vojislav Stoiljković. Finansijeri: Osnovna zajednica nauke Regiona Niša i "Djuro Salaj" iz Niša. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.7. Razvoj tehnologije i izrade alata elektroformiranjem. Period istraživanja: 1979.-1980. godina. Rukovodilac: prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Osnovna zajednica nauke Regiona Niša i EI-Niš. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

Naučno-istraživački projekti na čijoj se realizaciji mometano radi su:

2.8. Istraživanje i razvijanje energetskih komponenti pogon-

skog mehanizma zavojnih presa. Period istraživanja: 1979. -1981. godina. Rukovodilac: prof. dr Predrag Popović. Finansijeri: Osnovna zajednica nauke Regiona Niša i MIN - Niš. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

2.9. Analiza i razvoj integrisanih tehnoloških sistema sa automatskim i numeričkim upravljanjem za obradu deformisanjem. Period istraživanja: 1979.-1981. godina. Rukovodilac: prof. dr Aleksandar Pavlović. Finansijeri: Osnovna zajednica nauke Regiona Niša i MIN-Niš. Realizator: Institut Mašinskog fakulteta u Nišu.

3. ČASOPISI

Katedra za proizvodno mašinstvo izdaje od 1975. godine svoju publikaciju pod nazivom: "Sredstva i metode obrade deformisanjem". Do sada su iz štampe izali sledeći brojevi:

3.1. Niš, 1975, godina I, broj 1, pod nazivom: "Oscilovanje obradnog sistema".

3.2. Miš, 1975, godina I, broj 1, pod nazivom: "Izrada elemenata metodom dubokog izvlačenja".

3.3. Niš, 1975, godina I, broj 1, pod nazivom: "Oscilovanje obradnog sistema".

3.4. Niš, 1976, godina II, broj 1, pod nazivom: "Oscilovanje obradnog sistema".

3.5. Niš, 1976, godina II, broj 2, pod nazivom: "Prerada lima izvlačenjem i ocena obradivosti lima".

3.6. Niš, 1977, godina III, broj 1, pod nazivom: "Automatizacija tehnoloških postupaka".

3.7. Niš, 1977, godina III, broj 2, pod nazivom: "Zapreminsko deformisanje materijala".

3.8. Niš, 1978, godina IV, broj 1. i 2., pod nazivom: "Noseće strukture presa".

Publikacija je registrovana pod brojem: YU ISSN 0350-5731.

Najzad, u Nišu su izdata i tri broja časopisa: "Obrada deformisanjem u mašinstvu", i to brojevi: 3., 4. i 5.

4. SARADNJA SA UDRUŽENIM RADOM

Katedra za proizvodno mašinstvo ostvaruje saradnju sa udruženim radom preko Instituta Mašinskog fakulteta u Nišu, koji predstavlja integralni deo Fakulteta. Domen delatnosti Katedre se pri tome odvija u tri pravca, i to:

4.1. Istraživanje kompleksne problematike

Istraživanja kompleksne problematike su usmerena na kompleksno rešavanje odredjene problematike, na razradu naučno-istraživačkih pravaca, a u saradnji sa razvojnim jedinicama i organizacijama udruženog rada, ili drugim naučnim institucijama. Ovim se ostvaruje koncentracija napora naučnih radnika i usmeravanje ka rešavanju najaktuelnijih tema, eliminisanjem iz planova tema drugostepenog značaja.

Iz domena istraživanja kompleksne problematike uradjen je, ili je u toku realizovanja veći broj naučno-istraživačkih projekata, koji su navedeni u poglavlju 2.

4.2. Eksperimentalno-primenjena istraživanja

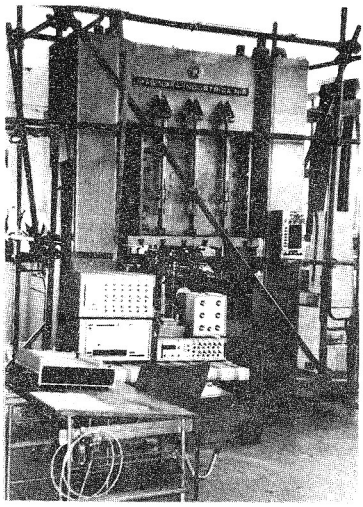
Teme koje se odnose na eksperimentalno-primenjena istraživanja obradjuju se u saradnji sa udruženim radom. To u velikoj meri doprinosi ubrzanju procesa korišćenja rezultata teorijskih istraživanja u cilju zadovoljenja potreba udruženog rada. Sa druge strane, taj proces je životno potreban samoj nauci, jer joj daje dragocen materijal o rezultatima praktične provere naučnih postavki, omogućujući joj da sa više sigurnosti vrši izbor pravaca daljih teorijskih istraživanja.

U domenu eksperimentalno-primenjenih istraživanja uradjen je, ili je u toku izrade veći broj projekata, pri ćemu se navode samo neki, i to:

- familija programiranih frikcionih presa za MIN-Niš;
- familija hidrauličkih presa za izradu elemenata dubokim izvlačenjem nestišljivim fluidom za MIN-Niš;
- familija elektro-zavojnih presa za MIN-Niš;
- tehnologija izrade CSW profila od lima u hladnom stanju metodom valjanja za "Lemind"-Leskovac; itd.

Na slici 1. prikazana je eksperimentalna hidraulička presa za

izradu elemenata dubokim izvlačenjem nestišljivim fluidom od 1000 kN pritiska, izradjena u saradnji sa MIN-Niš.



Slika 1.

4.3. Razvojna i specijalistička projektovanja i ispitivanja

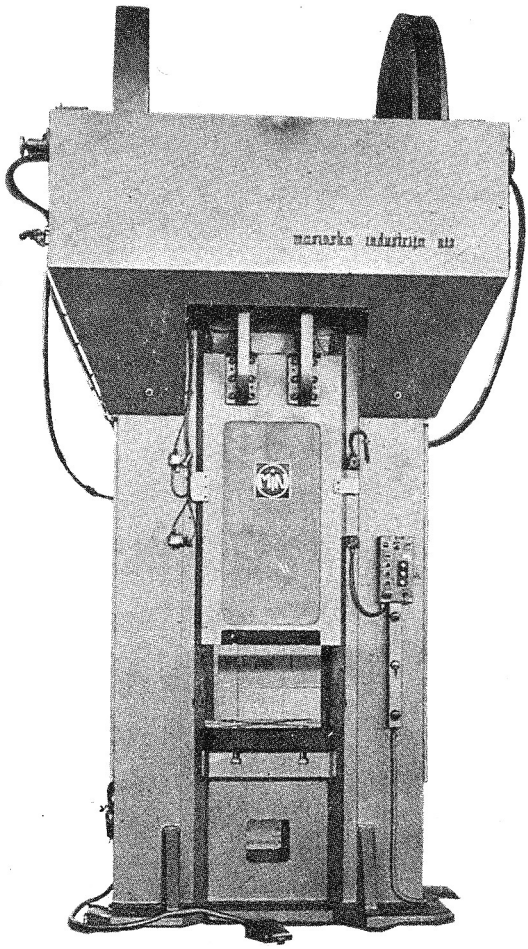
Razvojna i specijalistička projektovanja i ispitivanja vode se na osnovi ekonomskih ugovora sa udruženim radom, pri čemu se teži dohodovnom povezivanju. Ovaj domen delatnosti se karakteriše teorijskom sadržajnošću i usmerenošću na rešavanju naučno-stručnih problema primenjenog, odnosno aplikativnog karaktera, pa sve do ispitivanja i atestiranja sistema i proizvoda.

Iz domena razvojnih i specijalističkih projektovanja i ispitivanja uradjen je, takodje, veći broj radova. Radi ilustracije se navode neki od njih, i to:

- ispitivanje prototipa ekscentarske prese EPU 100 Mp za Fabriku mašina "ILR"-Železnik;
- ispitivanje ekscentarske prese EPU 160 Mp za "Jelšingrad" iz Banja Luke;
- ispitivanje prototipa prese PAI-20-PP za duboko izvlačenje sa stanjenjem zida omotača za "Igman" iz Konjica;
- kompletna ispitivanja obradivosti lima (dijagram deformabilnosti, maksimalni odnos izvlačenja, kvalitet maziva, itd.) za EI-Niš;

Na slici 2. prikazana je frikciona programirana presa od 2,5

MN iz familije od: 0,63; 1,0; 1,6; 2,0; 2,5 i 3,15 MN. Ove prese se izradjuju u dva tipa, i to: FPK- za kovanje i FPKL- za kalibrisanje.



Slika 2.

5. KAPACITETNI POTEMCIJALI

5.1. Kadrovi

- Dr Predrag Popović, dipl.ing.maš., red. profesor;
- Dr Aleksandar Pavlović, dipl.ing.maš., red. profesor;
- Dr Dobroslav Stanković, dipl.ing.met., van. profesor;

- Dr Miroslav Drezgić, dipl.ing.maš., van. profesor;
- Dr Ljubomir Janković, dipl.ing.maš., docent;
- Dr Vojislav Stoiljković, dipl.ing.maš., docent;
- Dr Dragan Domazet, dipl.ing.maš., docent;
- Mr Velibor Marinković, dipl.ing.maš., asistent;
- Mr Dušanka Vukićević, dipl.ing.met., asistent;
- Mr Miodrag Stoiljković, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Dragoljub Lazarević, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Miroslav Trajanović, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Dragan Temeljkovski, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Bojan Rančić, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Goran Radenković, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik;
- Miodrag Manić, dipl.ing.maš., asistent-pripravnik
- Bogomir Minčić, dipl.ing.maš., stručni saradnik;
- Goran Djurdjanović, laborant i
- Novica Jovanović, laborant.

Osim navedenih izvršilaca, koji čine stalni sastav Katedre, koriste se u nastavnom i naučno-istraživačkom radu:

- nastavnici i saradnici sa drugih katedri;
- spoljni saradnici u svim zvanjima sa drugih fakulteta i iz udruženog rada i
- studenti na II i III stepenu studija.

5.2. Oprema

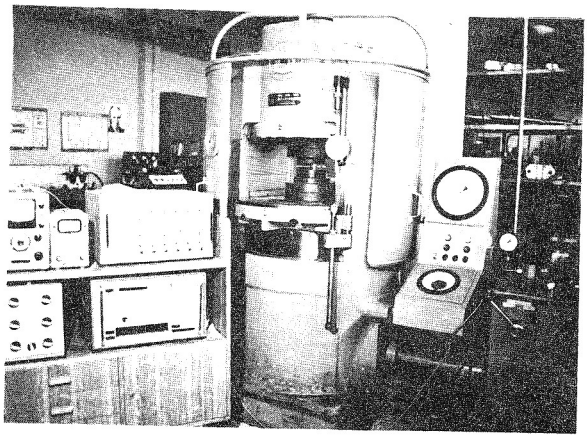
Za obavljanje eksperimentalnog dela istraživanja, kao i za merenje odredjenih veličina i parametara, i ispitivanje mašinskih sistema raspolaže se solidnom savremenom opremom, pri čemu se navodi najvažnija, i to:

5.2.1. Merna oprema

- 10 kanala za dinamička merenja (pojačivači firme Hottinger);
- 70 kanala za statička merenja (pojačivač i preklopnik firme Hottinger);
- 16-to kanalni oscilograf;
- osciloskop sa memorijom;
- 10 kanala sa induktivnim snimačima puta za snimanje elastične linije opterećenih konstrukcija i ispitivanje krutosti mašine;

- snimači za silu od 100 N, 50 kN, 200 kN i 1000 kN;
- snimači za merenje pritiska od 0 do 1000 bara;
- snimači temperature od 0 do 1200°C;
- snimači za merenje puta, brzine i ubrzanja;
- ultrazvučni defektoskop tipa UD-10 VA za područje 0-18 MH;
- aparati za merenje tvrdoće po Rokvelu, Brinelu i Vikersu;
- uredjaj za merenje buke;
- kidalica od 300 kN;
- kompletna oprema za metalografska ispitivanja;
- mašina za simulativna ispitivanja limova (simulira proces izvlačenja i odredjuje odnos koeficijenta izvlačenja, ispituje mazivo, radi probe Erichen-a, Engellart-a, itd.);
- uredjaj za snimanje dijagrama granične deformabilnosti;
- uredjaj za elektro-hemijsko nanošenje koordinatnih mreža;
- aparat za ispitivanje hrapavosti obradjenih površina sa pisačem;
- x-y i y-t pisač A3 formata;
- dva probna pneumatska stola sa velikim brojem pneumatskih elemenata za ispitivanje različitih pneumatskih shema; itd.

5.2.2. Mašine



Slika 3.

- univerzalni strug PA-C-30/1500 "Potisje"-Ada;
- brusilica za ravno brušenje SRP-75;
- univerzalna glodalica "Prvomajska"-Zagreb;
- kratkohoda rendisaljka;

- stona bušilica;
- hidraulička presa od 12,5 MN, prikazana na slici 3.;
- ekscentarska presa od 250 kN, "Jelšingrad"-Banja Luka;
- eksentarska presa od 250 kN, "Pobeda"-Novi Sad;
- specijalan hidraulički agregat pritiska do 1500 bara za oblikovanje nestišljivim fluidom; itd.

6. DOKTORSKE DISERTACIJE

Na Mašinskom fakultetu u Nišu odbranjene su sledeće doktorske disertacije iz oblasti koje su domen delatnosti Katedre za proizvodno mašinstvo, i to:

6.1. PREDRAG POPOVIĆ: Uticaj svojstava materijala pri deformacionoj obradi na elastično ponašanje tela mehaničkih krivajnih presa otvorenog tipa u vezi štetnog delovanja inercijalnih sila. Odbranjena 1972.

6.2. ALEKSANDAR PAVLOVIĆ: Identifikacija i optimizacija zakona kretanja masa pneumatskog čekića sa eksperimentalnom verifikacijom. Odbranjena 1975.

6.3. VOJISLAV STOILJKOVIĆ: Naponsko i deformaciono stanje pri izradi elemenata dubokim izvlačenjem nestišljivim fluidom sa pridrživačem i identifikacija uticajnih faktora sa uspostavljanjem njihovih korelacionih odnosa. Odbranjena 1977.

6.4. DOBROSLAV STANKOVIĆ: Proučavanje faktora koji utiču na kristalizaciju i fizičko-mehanička svojstva sivog liva kao konstrukcionog materijala. Odbranjena 1977.

6.5. MIROSLAV DREZGIĆ: Prilog istraživanjima uslova i principa sigurnog i bezbednog rada na mašinama za obradu materijala deformisanjem, sa posebnim osvrtom na mehaničke prese. Odbranjena 1980.

6.6. LJUBOMIR JANKOVIĆ: Izrada alata za obradu plastičnih masa utiskivanjem u hladnom stanju sa identifikacijom uticajnih faktora i uspostavljanjem korelacionih odnosa medju njima. Odbranjena 1981.

6.7. VINKO VOLČANŠEK: Istraživanje uticajnih faktora na na otpor isticanja i njihove korelacione odnose pri istosme-

rnom toplom presovanju legure AlMgSi-0,5 u proizvodnim uslovima. Odbranjena 1981.

6.8. DRAGAN DOMAZET: Iznalaženje optimalne noseće strukture zatvorenog tipa hidrauličke prese i postavljanje metoda njenog proračuna. Odbranjena 1981.

7. OBJAVLJENI RADOVI

001. POPOVIĆ P.;VUKOTIĆ S.: Primena epoksilenskih smola u industriji, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1963, XII, 2.

002. VUKOTIĆ S.;POPOVIĆ P.: Izrada fabrikacionih alata od epoksilenskih smola, Tehnika (Opšti deo), Beograd, 1964, XIII, 5.

003. POPOVIĆ P.: Izbor nekih veličina pri projektovanju ekscentarskih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1965, XIV, 8.

004. POPOVIĆ P.: Optimalni položaj cilindara hidrauličkih presa u odnosu na radni sto, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1964, XIII, 7.

005. PAVLOVIĆ R.;POPOVIĆ P.: Odredjivanje normalnih zazora u alata za prosecanje i probijanje, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1965, XIV, 10.

006. POPOVIĆ P.; DJURKOVIĆ A.: Prilog unifikaciji pogonskog mehanizma mehaničkih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1965, XIV, 10.

007. POPOVIĆ P.: Prilog rešavanju problema mogućnosti povećanja broja hodova pritiskivača postojećih ekscentarskih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1966, XV, 5.

008. POPOVIĆ P.: Prilog rešavanju problema izbora tipa pneumatskog uravnoteživača pritiskivača mehaničkih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1966, XV, 10.

009. POPOVIĆ P.: Prilog izračunavanju sila prednaprezanja vijaka presa otvorene konstrukcije, Strojniški vestnik, Ljubljana, 1967, XIII, 3.

010 POPOVIĆ P.: Prednapregnuti vijci mehaničkih presa otvorenog tipa i njihov proračun, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1968, XVII, 5.

011. POPOVIĆ P.: Prilog izvlačenju limova sa primenom uredjaja za držanje, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1968, XVII, 6.

012. POPOVIĆ P.: Uticaj položaja krivajnog mehanizma na opterećenja pogonskog mehanizma krivajnih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1968, XVII, 8.

013. POPOVIĆ P.: Elastične deformacije tela mehaničkih presa otvorene konstrukcije kao izvori pojave nepoželjnih inercijalnih sila, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1968, XVII, 9.

014 POPOVIĆ P.: Prilog analizi proširenja domena primene unificiranog pogonskog mehanizma mehaničkih krivajnih presa, Zbornik radova VI savetovanja proizvodnog mašinstva, Opatija, 1970.

015. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju efikasnosti primenjivanih sistema osiguranja mehaničkih krivajnih presa od preopterećenja, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1971, XX, 3.

016. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: Prilog rasmatranju uticaja uvijanja tela mehaničkih presa otvorene konstrukcije na alat, Zbornik objav VIII posvetovanja proizvodnega strojarstva, Ljubljana, 1973.

017. POPOVIĆ P.: Uticaj vrste obrade materijala deformacijom na elastične deformacije obradnog sistema, Zbornik radova BIAM'73, sveska I, Zagreb, 1973.

018. POPOVIĆ P.:Oscilovanje obradnog sistema pri obradi materijala deformacijom i njegov odraz na njegove konstruktivno-tehnološke karakteristike, Zbornik radova stručno-naučnog skupa "MAŠINSTVO 1873-1973", Beograd, 1973.

019. POPOVIĆ P.: Neka rasmatranja uticaja zazora i uslova vodjenja izvršnog organa mašine za obradu materijala deformacijom na njegova odstupanja od optimalnog položaja u toku procesa obrade, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1974, XXIII, 1.

020. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.: Uticaj prednapregnutih vijaka na elastične deformacije mehaničkih presa otvorene konstrukcije i pojavu nepoželjnih inercijalnih sila, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1974, 2.

021. POPOVIĆ P.: Promena procepa u alata za obradu materijala deformacijom u presama otvorenog tipa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1974, XXIII, 2.

022. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.;BOGDANOV LJ.: Prilog rasmatranju neravnomernosti deformacije pri oblikovanju predmeta obrade plastičnom deformacijom, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1974, XXIII, 9.

023. POPOVIĆ P.: Stepen energetskog iskorišćenja mehaničkih krivajnih presa pri rafalnom režimu rada, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1974, XXIII, 11.

024. POPOVIĆ P.: O nekim prednostima sprovodjenja unifikacije pogonskog mehanizma mehaničkih krivajnih presa, Zbornik radova sa simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Beograd, 1974.

025. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.;BOGDANOV LJ.: Ispitivanje neravnomernosti deformacije pri sabijanju elemenata, Zbornik radova IX savetovanja proizvodnog mašinstva, Niš, 1974.

026. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju problema proizvodnosti po količini obradjenih elemenata i stepena iskorišćenja u mehaničkih krivajnih presa, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1975, XXIV, 2.

027. POPOVIĆ P.: Uticaj vrste i debljine materijala na relativnu dubinu otsecanja pri prosecanju i probijanju, SIMOD, Niš, 1975, I, 1.

028. POPOVIĆ P.: Kritični zakoni promene opterećenja pri obradi materijala deformacijom, SIMOD, Niš, 1975, I, 1.

029. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.: Uticaj elastičnih deformacija noseće strukture mehaničkih krivajnih presa na kinematičke veličine kretanja pritiskivača, SIMOD, Niš, 1975, I, 1.

030. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.;HEDRIH K.: Teorijska analiza oscilacija zamajca mehaničkih krivajnih presa otvorenog tipa preko mehaničkog modela sa dve koncentrisane mase, SIMOD, Niš, 1975, I, 1.

031. POPOVIĆ P.: Eksploatacijski stepen iskorišćenja mašina za o-

bradu materijala deformisanjem statičkog dejstva, Zbornik radova Mašinskog fakulteta u Nišu, Niš, 1975.

032. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju problematike izrade predmeta rada dubokim izvlačenjem, SIMOD, Niš, 1975, I, 2.

033. POPOVIĆ P.;BOGDANOV LJ.: Osnovni pravci razvitka kovačko-preserskih kapaciteta i metodološka osnova određivanja ekonomskog efekta, MAG, Beograd, 1972, I, 4.

034. POPOVIĆ P.: Prilog koncepcijskoj analizi mašina za obradu materijala deformisanjem statičkog dejstva, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Novi Sad, 1975, 1.

035. POPOVIĆ P.;VULIĆ A.;DJURDJANOVIĆ M.: Prilog rasmatranju problema prednapregnutih vijaka noseće strukture mašina za obradu materijala deformisanjem zatvorenog tipa i podjednakih krutosti njenih elemenata, SIMOD, Niš, 1976, II, 1.

036. POPOVIĆ P.;BOGDANOV LJ.: Metode kovanja u kalupima i stepen iskorišćenja materijala, SIMOD, Niš, 1976, II, 1.

037. POPOVIĆ P.;JANKOVIĆ LJ.: Prilog rasmatranju problema veka alata za prosecanje i probijanje, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Novi Sad, 1976, II, 2.

038. POPOVIĆ P.: Stanje i perspektive razvoja obrade materijala deformisanjem, SIMOD, Niš, 1976, II, 2.

039. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju modela noseće strukture mašina za obradu materijala deformisanjem otvorenog tipa, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Niš, 1977, III, 3.

040. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.;BOGDANOV LJ.: Doprinos i razvoj stvaralaštva u nas i njegov značaj za razvoj industrije, Jugoslovensko pronalazaštvo, Beograd, 1977, XVIII, 195.

041. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju problema proizvodnosti mašina za obradu materijala deformisanjem, Zbornik radova naučno-stručnog skupa "OBRADA DEFORMISANJEM", Banja Luka, 1977.

042. POPOVIĆ P.;JANKOVIĆ LJ.: Prilog rasmatranju problema kompleksnog modela i klasifikacija metoda izrade elemenata utiskivanjem, SIMOD, Niš, 1977, III, 2.

043. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: Prilog analizi prenosa energije zamajca u frikcionih presa bez diskova, Zbornik radova II jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Niš, 1977.

044. POPOVIĆ P.;STOJANOVIĆ M.: Prilog koncepcijskoj analizi mašina za izradu profilisanih elemenata od lima, Zbornik radova II jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI, Niš, 1977.

045. POPOVIĆ P.: Uticaj zakona promene kretanja pogonskog mehanizma mehaničkih krivajnih presa na proizvodnost, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Niš, 1977, III, 4.

046. POPOVIĆ P.: Ukupni stepen tehničko-tehnološkog iskorišćenja mašina za obradu materijala deformisanjem kao pokazatelj stanja i perspektive razvoja sredstava rada za obradu materijala deformisanjem, Zbornik radova sa BIAM'78, Zagreb, 1978.

047. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: Prednapregnute jednodelne noseće strukture presa, Zbornik radova sa BIAM'78, Zagreb, 1978.

048. STOILJKOVIĆ V.;POPOVIĆ P.;ŠOLAJA V.: Druckbestimmung beim Tiefziehen von konischen Elementen mit Workmedien, Annals of the CIRP, Eindhoven (Holandija), 1978.

049. POPOVIĆ P.;ŠEHOVIĆ E.: Prilog rasmatranju problema ispitivanja mašina za obradu deformisanjem, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Niš, IV, 1978, 5.

050. POPOVIĆ P.;HEDRIH K.;STOILJKOVIĆ V.: Prilog teorijskoj analizi oscilovanja zamajca mehaničkih krivajnih presa otvorenog tipa sa prednapregnutim vijcima, SIMOD, Niš, 1978, IV, 1 i 2.

051. POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju problema prednapregnutih vijaka mašina za obradu materijala deformisanjem zatvorenog tipa, SIMOD, Niš, 1978, IV, 1.i 2.

052. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: Prilog proračunu jednodelnih prednapregnutih otvorenih nosećih struktura prese sa prednapregnutim elementima na otvorenom kraju strukture, SIMOD, Niš, 1978, IV 1.i2.

053. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: Proračun jednodelnih otvorenih nosećih struktura presa sa prednapregnutim elementima u stubnom delu strukture, SIMOD, Niš, 1978, Iv, 1 i 2.

054. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.: A contribution to the analysis of the flywheel energy transfer of friction screw presses without side discs, Proceedings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Montreal, Kanada, 1979.

055. DJUKIĆ H.;POPOVIĆ P.: Prilog rasmatranju uticaja debljine dna i visine pripremka na zakon promene deformacione sile izvlačenja, Zbornik radova sa BIAM'80, Zagreb, 1980.

056. POPOVIĆ P.;PANTELIĆ T.: Jedan primer ostvarenja usaglašenosti potreba tehnološkog procesa i mogućnosti sredstava rada, III jugoslovenski simpozijum "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI",Mostar, 1980.

057. DJUKIĆ H.;POPOVIĆ P.;PANTELIĆ T.: Prilog istraživanju uticaja ugla izvlačenja na promenu površinske tvrdoće pri izradi cilindričnih elemenata, Zbornik radova III jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Mostar, 1980.

058. STOILJKOVIĆ V.;POPOVIĆ P.;PANTELIĆ T.: Prilog rasmatranju uticaja zakona promene brzine deformisanja i konfiguracije alata na proces izvlačenja sa stanjenjem omotača, Zbornik radova III jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Mostar, 1980.

059. DOMAZET D.;MARINKOVIĆ V.;POPOVIĆ P.;PANTELIĆ T.: Neki rezultati ispitivanja opterećenja i stepena neuravnoteženosti elemenata pogonskog mehanizma i noseće strukture mehaničke prese sa kinematičkim delom u obliku zglobnog četvorougaonika proširenog dodatnom dijadom, Zbornik radova III jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Mostar, 1980.

060. DJUKIĆ H.;POPOVIĆ P.: Prilog modeliranju procesa izvlačenja pri narušavanju sličnosti brzine deformisanja, Zbornik radova

pri narušavanju sličnosti brzine deformisanja, Zbornik radova III jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Mostar, 1980

061. POPOVIĆ P.;DOMAZET D.;TEMELJKOVSKI D.: Prilog uporednoj analizi energetskog dela pogonskog mehanizma zavojnih presa, Zbornik radova III jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Mostar, 1980.

062. POPOVIĆ P.;DJUKIĆ H.: Prilog rasmatranju uticaja brzine deformisanja na zakon promene deformacione sile pri dubokom izvlačenju, Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1981, XXX, 9.

063. POPOVIĆ P.;DJUKIĆ H.: Prilog rasmatranju problema iznalaženja optimalnog zakona promene debljine omotača po visini cilindričnog elementa sa aspekta nepromenljivosti čvrstoće, a obzirom na fenomen ojačavanja materijala, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Novi Sad, 1980, 6.

064. POPOVIĆ P.;STOILJKOVIĆ V.;DOSTANIĆ Č.;NIKOLIĆ D.;BOGDANOV LJ. MILOVANOVIĆ P.;MILOJKOVIĆ R.;MINČIĆ B.;JOKSIMOVIĆ B.: Metode i alati za zapreminsko oblikovanje i kovanje, Priručnici SA, br. 2, Niš, 1980.

065. PAVLOVIĆ A.: Analiza parametara kod konstruisanja vazdušnog čekića, Tehnički vesnik, Železnik, 1958, 1.

066. PAVLOVIĆ A.: Radne karakteristike i tipizacija u savremenoj gradnji alatnih mašina, Tehnika (Mašinstvo), 1966, 3.

067. PAVLOVIĆ A.: Prilog metodologiji umanjenja verovatnoće kvara, Tehnika (Mašinstvo), 1967, 1.

068. PAVLOVIĆ A.: Predvidjanje pouzdanosti modela automatskog sistema, Mehanizacija i automatizacija H-F-E-A, Beograd, 1968, 5.

069. PAVLOVIĆ A.: Numerički metodi provere pouzdanosti mašine alatke, Zbornik radova V savetovanja proizvodnog mašinstva, Kragujevac, 1969.

070. PAVLOVIĆ A.: Stanje i razvoj industrije alatnih mašina u SR Srbije, Privredna komora Srbije, 1970.

071. PAVLOVIĆ A.;DOMAZET D.: Prilog aplikaciji računara na polju projektovanja tehnoloških procesa, IX simpozijum JUPITER, Beograd, 1974.

072. PAVLOVIĆ A.: Jedan pristup identifikaciji realnih mašinskih sistema na primeru vazdušnog čekića, Zbornik radova X savetovanja proizvodnog mašinstva, Beograd, 1975.

073. PAVLOVIĆ A.: Identifikacija ponašanja objekata sistema vazdušnog čekića, Stručno-naučni skup "15 godina mašinstva", Niš 1975.

074. PAVLOVIĆ A.: Problematika projektovanja obradnog sistema za obradu materijala deformisanjem - vazdušnog čekića, SIMOD, Niš, 1975, I, 3.

075. PAVLOVIĆ A.: Opis dinamičko-kinematičkog ponašanja sistema vazdušnog čekića, SIMOD, Niš, 1975, I, 3.

076. PAVLOVIĆ A.: Metodika postavljanja matematičkog modela vazd-

dušnog čekića, SIMOD, Niš, 1975, I, 3.

077. PAVLOVIĆ A.: Optimizacija glavnih parametara vazdušnog čekića, SIMOD, Niš, 1975, I, 3.

078. PAVLOVIĆ A.: Razvoj nove game programiranih frikcionih presa XI savetovanje proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1977.

079. PAVLOVIĆ A.: Jedan pristup optimizaciji ponašanja mehanizama frikcione prese, Zbornik radova II jugoslovenskog simpozijuma "MAŠINE I MEHANIZMI-UNIVERZITETSKA ISTRAŽIVANJA I PRIMENA U INDUSTRIJI", Niš, 1977.

080. SPASIĆ R.;PAVLOVIĆ A.: Neke karakteristike razvijenog modula za pozicioniranje mašine alatke, Zbornik radova XII savetovanja proizvodnog mašinstva, Maribor, 1978.

081. PAVLOVIĆ A.: Analitičko ispitivanje ponašanja sistema mašina alatka - merni sistem, Zbornik radova XII savetovanja proizvodnog mašinstva, Maribor, 1978.

082. TASIĆ Ž.;PAVLOVIĆ A.;MILENKOVIĆ N.;MILOSAVLJEVIĆ Č.: Jedno rešenje mikroračunarskog sistema za numeričko upravljanje, Saopštenje 151-1, BiH, simpozijum iz informatike, Sarajevo, 1980.

083. PAVLOVIĆ A.;DJORDJEVIĆ DJ.;TRAJANOVIĆ M.: Odredjivanje sopstvenih frekvenci i oblika oscilovanja strukture alatne mašine upotrebom programa DIMA, Zbornik radova XIII savetovanja proizvodnog mašinstva, Banja Luka, 1979.

084. PAVLOVIĆ A.: Metodologija i programski paket za simulaciju dinamičkog ponašanja frikcione prese, Zbornik radova sa simpozijuma BIAM'80, Zagreb, 1980.

085. PAVLOVIĆ A.: Optimizacija parametara rama frikcione prese, Zbornik radova Mašinskog fakulteta u Nišu, Niš, 1980.

086. JANKOVIĆ LJ.: Primena legure bakra-berilijuma u izradi kalupa za preradu plastomera, Zbornik radova sa II medjunarodnog savetovanja o proizvodnji, primeni i preradi polimernih materijala, Zagreb, 1975.

087. JANKOVIĆ LJ.: Neke industrijske metode izrade elemenata izvlačenjem pomoću nestišljivog fluida, SIMOD, Niš, 1975, I, 2.

088. JANKOVIĆ LJ.: Prilog rasmatranju veka alata za prosecanje i probijanje, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Novi Sad, 1976 II, 2.

089. JANKOVIĆ LJ.;TASIĆ V.: Mere za otstranjivanje netačnosti pri izradi elemenata od lima, SIMOD, Niš, 1976, II, 2.

090. JANKOVIĆ LJ.: Istraživanje procesa tečenja materijala pri izradi alata utiskivanjem, Zbornik radova XI savetovanja proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1977.

091. JANKOVIĆ LJ.: Prilog rasmatranju problema vezanih za utiskivanje u polubeskonačnu plastičnu sredinu, SIMOD, Niš, 1977, III, 2.

092. JANKOVIĆ LJ.: Primena metoda utiskivanja u izradi alata, SIMOD, Niš, 1977, III, 2.

093. JANKOVIĆ LJ.;MILJKOVIĆ Ž.;VUKIĆEVIĆ D.: Neka iskustva u izr-

adi delova od tankih limova fotohemijskim postupkom i perspektiva dalje primene u mašinstvu. Zbornik radova XI savetovanja proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1977.

094. JANKOVIĆ LJ.: Prilog rasmatranju problema tiskača u procesu obrade materijala utiskivanjem. XIII savetovanje proizvodnog mašinstva, Banja Luka, 1979.

095. JANKOVIĆ LJ.: Teorijsko-eksperimentalna istraživanja i ispitivanja uticajnih faktora na deformacionu silu pri izradi elemenata utiskivanjem u hladnom stanju. Zbornik radova Mašinskog fakulteta u Nišu, Niš, 1980.

096. STOILJKOVIĆ V.: Uticaj promene dohvata na elastične deformacije i težinu prese otvorenog tipa. Zbornik radova VI savetovanja proizvodnog mašinstva, Opatija, 1970.

097. STOILJKOVIĆ V.: Prikaz izrade elemenata od lima dubokim izvlačenjem pomoću nestišljivog fluida. Zbornik radova IX savetovanja proizvodnog mašinstva, Niš, 1974.

098. STOILJKOVIĆ V.: Rasmatranje procesa deformisanja elemenata pri dubokom izvlačenju nestišljivim fluidom. SIMOD, Niš, 1975, I, 2.

099. STOILJKOVIĆ V.: Analiza deformacionog stanja pri izradi elemenata izvlačenjem nestišljivim fluidom. SIMOD, Niš, 1975, I, 2.

100. STOILJKOVIĆ V.: Izrada elemenata nestišljivim fluidom sa pridrživačem. "Obrada deformisanjem u mašinstvu", Novi Sad, 2, 1976.

101. Odredjivanje karakterističnih veličina koje definišu obradivost lima izvlačenjem. SIMOD, Niš, 1976, II, 2.

102. STOILJKOVIĆ V.: Keeler-Goodwin-ov dijagram granične deformabilnosti i analiza rasporeda deformacija. SIMOD, Niš, 1976, II, 2.

103. STOILJKOVIĆ V.: Analiza oblika i raspodele deformacija koničnih elemenata pri izvlačenju nestišljivim fluidom. Zbornik radova XI savetovanja proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1977.

104. STOILJKOVIĆ V.: Odredjivanje pritiska fluida pri izvlačenju cilindričnih elemenata nestišljivim fluidom. Zbornik radova XI savetovanja proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1977.

105. STOILJKOVIĆ V.: Odredjivanje sile pridrživa̧a pri izvlačenju elemenata nestišljivim fluidom. "Obrada deformisanjem u mašinstvu", Niš, 1978, 5.

106. STOILJKOVIĆ V.: Eksperimentalno snimanje nekih veličina pri izvlačenju cilindričnih elemenata fluidom. Zbornik radova XIII savetovanja proizvodnog mašinstva, Banja Luka, 1979.

107. STOILJKOVIĆ V.: Odredjivanje krivih očvršćavanja jednoosnim etapnim istezanjem. Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1979, 3.

108. STOILJKOVIĆ V.: Analyse der Form und Formänderungsverteilung der zylindrischen Elemente beim Tiefziehen mit Wirkmedien. Kongres I.D.D.R.G. u Metz-u, 1980.

109. DOMAZET D.,STOILJKOVIĆ V.: Hidraulička presa za izvlačenje lima nestišljivim fluidom. Zbornik radova BIAM'80, Zagreb, 1980.

110. STOILJKOVIĆ V.,RANČIĆ B.,LAZAREVIĆ D.: Prikaz alata za izradu CSV profila na liniji za profilisanje. Zbornik radova XIV savetovanja proizvodnog mašinstva, Čačak, 1980.

111. DIMITROV B.,STOILJKOVIĆ V.: Prilog rasmatranju problema nestabilnosti lima pri izvlačenju. Zbornik radova Savetovanja rudara i metalurga, Bor, 1980.

112. STOILJKOVIĆ V.: Odredjivanje krivih očvršćavanja dvoosnim istezanjem. Zbornik radova Mašinskog fakulteta, Niš, 1980.

113. STOILJKOVIĆ V.: Oblikovanje cevi nestišljivim fluidom. Zbornik radova Mašinskog fakulteta, Niš, 1980.

114. STOILJKOVIĆ V.: Eksperimentalno odredjivanje krivih očvršćavanja etapnim istezanjem. Tehnika (Mašinstvo), Beograd, 1981 5.

115. STOILJKOVIĆ V.: Odredjivanje graničnog odnosa izvlačenja. Elektronik, Niš, 1981, 1.

116. STOILJKOVIĆ V.: Zbirka zadataka sa teorijskim osnovama iz obrade deformisanjem. Niš, 1980.

117. STOILJKOVIĆ V.: Laboratorijski praktikum sa teorijskim osnovama iz obrade deformisanjem, Niš, 1980.

118. STOILJKOVIĆ V.: Merenje mehaničkih veličina električnim putem, Niš, 1980.

119. STOILJKOVIĆ V.: Teorijske osnove oblikovanja lima deformisanjem, Niš, 1980.

120. DOMAZET D.: Eksperimentalna identifikacija napona u telu ekscentarske prese EPNB-25 pri statičkom opterećenju. SIMOD, Niš, 1975, I, 1.

121. DOMAZET D.: Sopstvene frekvencije i oblici oscilovanja noseće strukture mehaničkih krivajnih presa otvorenog tipa. SIMOD, Niš, 1975, I, 3.

122. DOMAZET D.: Frekventme karakteristike noseće strukture mehaničkih ekscentarskih presa otvorenog tipa. SIMOD, Niš, 1975, I,3.

123. DOMAZET D.: Prilog proračunu inercijalnih sila u mehaničkih krivajnih presa. SIMOD, Niš, 1976, II, 1.

124. DOMAZET D.: Prilog rasmatranju dinamičke krutosti nosećih struktura mehaničkih krivajnih presa. SIMOD, Niš, 1976, II, 1.

125. DOMAZET D.: Neki rezultati ispitivanja dinamičkog ponašanja noseće strukture prototipa brzohode ekscentarske prese - automata BPA 15. Zbornik radova naučno-stručnog skupa: "Obrada deformisanjem", Banja Luka, 1977.

126. DOMAZET D.: Proračun statičke krutosti otvorenih nosećih struktura mehaničkih krivajnih presa primenom metode grede. VII simpozijum: "Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala", Beograd, 1977.

127. DOMAZET D.: Prilog eksperimentalnom odredjivanju energetskog bilansa i energetskog stepena iskorišćenja ekscentarskih presa. Zbornik radova XIII savetovanja proizvodnog mašinstva, Banja Luka, 1979.

128. DOMAZET D.: Prilog proučavanju jednodelnih nosećih struktura. SIMOD, Niš, 1978, IV, 1. i 2.

129. DOMAZET D.: Proračun prednapregnutih jednodelnih zatvorenih nosećih struktura prese. SIMOD, Niš, 1978, IV, 1. i 2.

130. DOMAZET D.: Analiza uticaja uležištenja vratila ekscentarske prese na njenu krutost eksperimentalnim putem. SIMOD, Niš, 1978, IV, 1. i 2.

131. DOMAZET D.: Analiza nosećih struktura presa metodom konačnih elemenata. Zbornik radova Mašinskog fakulteta, Niš, 1980.

132. DOMAZET D.: Jedan pristup konstruisanju nosećih struktura prese pomoću računara. Zbornik radova naučno-stručnog skupa: "Nauka o konstruisanju i konstruisanje pomoću računara", Zagreb, 1981.

133. MARINKOVIĆ V.: Analitičko-eksperimentalni metod odredjivanja radnog pritiska istosmernog istezanja čelika u hladnom stanju. SIMOD, Niš, 1977, III, 2.

134. MARINKOVIĆ V.: Tačnost izrade elemenata od lima izvlačenjem. SIMOD, Niš, 1976, II, 2.

135. STOILJKOVIĆ M.: Prilog analizi prekidnih kretanja sa aspekta konstruktivnih i eksploatacionih mogućnosti pneumatskih obrtnih stolova. SIMOD, Niš, 1977, III, 1.

136. STOILJKOVIĆ M.: Programsko-redosledno upravljanje radnim ciklusom razvodnicima 3/2. Zbornik radova IX savetovanja proizvodnog mašinstva, Niš, 1974.

137. TRAJANOVIĆ M.: Primer statičke i dinamičke identifikacije ekscentarske prese. SIMOD, Niš, 1978, IV, 1. i 2.

138. RANČIĆ B.: Eksperimentalno ispitivanje stepena punoće dijagrama sila-hod za prvu operaciju izvlačenja. Zbornik radova sa seminara: "Specifični problemi projektovanja i izrade finomehaničkih uredjaja", Niš, 1981.

139. STANKOVIĆ D.: Uticaj hemijskog sastava na korozionu otpornost hrom-nikl čelika. Zaštita materijala, Beograd, 1965, 6-7.

140. STANKOVIĆ D.: Metode borbe protiv medjukristalne korozije nerdjajućih hrom-nikl čelika. Zaštita materijala, Beograd,1966.

141. STANKOVIĆ D.,PAJEVIĆ M.: Uticaj debljine zida na tvrdoću sivog liva. Livarstvo, Beograd, 1965, 63-64.

142. STANKOVIĆ D.: Aluminijumske bronze za livenje, svojstva i primena sa gledišta našeg i nekih inistranih standarda. Livarstvo, 1966, 65-66.

143. STANKOVIĆ D.,Wahn G.: Doprinos odredjivanju sadržaja Si u livenom gvožđju merenjem kontaktnog termonapona. Tehnika, 1968, Beograd, 2.

144. STANKOVIĆ D.: Uticaj geometrijskog karaktera odlivaka na mehanička svojstva sivog liva. Livarstvo, Beograd, 1968, 77-79.

145. STANKOVIĆ D.: Svojstva i primena Ni-rezist livenih gvoždja. Livarstvo, Beograd, 1969, 1.

146. STANKOVIĆ D.: Strukturne karakteristike visoko legiranih hrom-nikl čelika. Tehnika, Beograd, 1976, 4.

147. STANKOVIĆ D.: Ispitivanje faktora koji utiču na sposobnost prigušivanja sivog liva. Zbornik radova simpozijuma o metalurgiji, Beograd, 1978.

148. VUKIĆEVIĆ D.: Disperzno ojačanje bakra dodatkom Al_2O_3 praćeno preko veličine zrna i mikrotvrdoće. SIMOD, Niš, 1977, III, 2.

149. VUKIĆEVIĆ D.: Promena gustine bakra sa dodatkom Al_2O_3 pri presovanju različitim pritiscima presovanja. Zbornik radova sa XIII savetovanja proizvodnog mašinstva, Banja Luka, 1979.

150. VUKIĆEVIĆ D.: Dobijanje obojenog oksidnog sloja pri anodizaciji legura tipa Al-Si. Zbornik radova Mašinskog fakulteta, Niš, 1980.

151. Z.NIKOLIĆ, MISTIĆ M.,VUKIĆEVIĆ D.: Prilog proučavanju presovanja sistema Cu-Al_2O_3. Hemijska industrija, Beograd, 1979, 33. 104.