

30 ГОДИНИ  
НАСТАВА ПО МАШИНСТВО  
ВО СР МАКЕДОНИЈА

22 СОВЕТУВАЊЕ ЗА  
ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО  
НА ЈУГОСЛАВИЈА

# ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ

II

ОБРАБОТКА СО ДЕФОРМАЦИЈА

Охрид, мај 1989.

30 ГОДИНИ  
НАСТАВА ПО МАШИНСТВО  
ВО СР МАКЕДОНИЈА

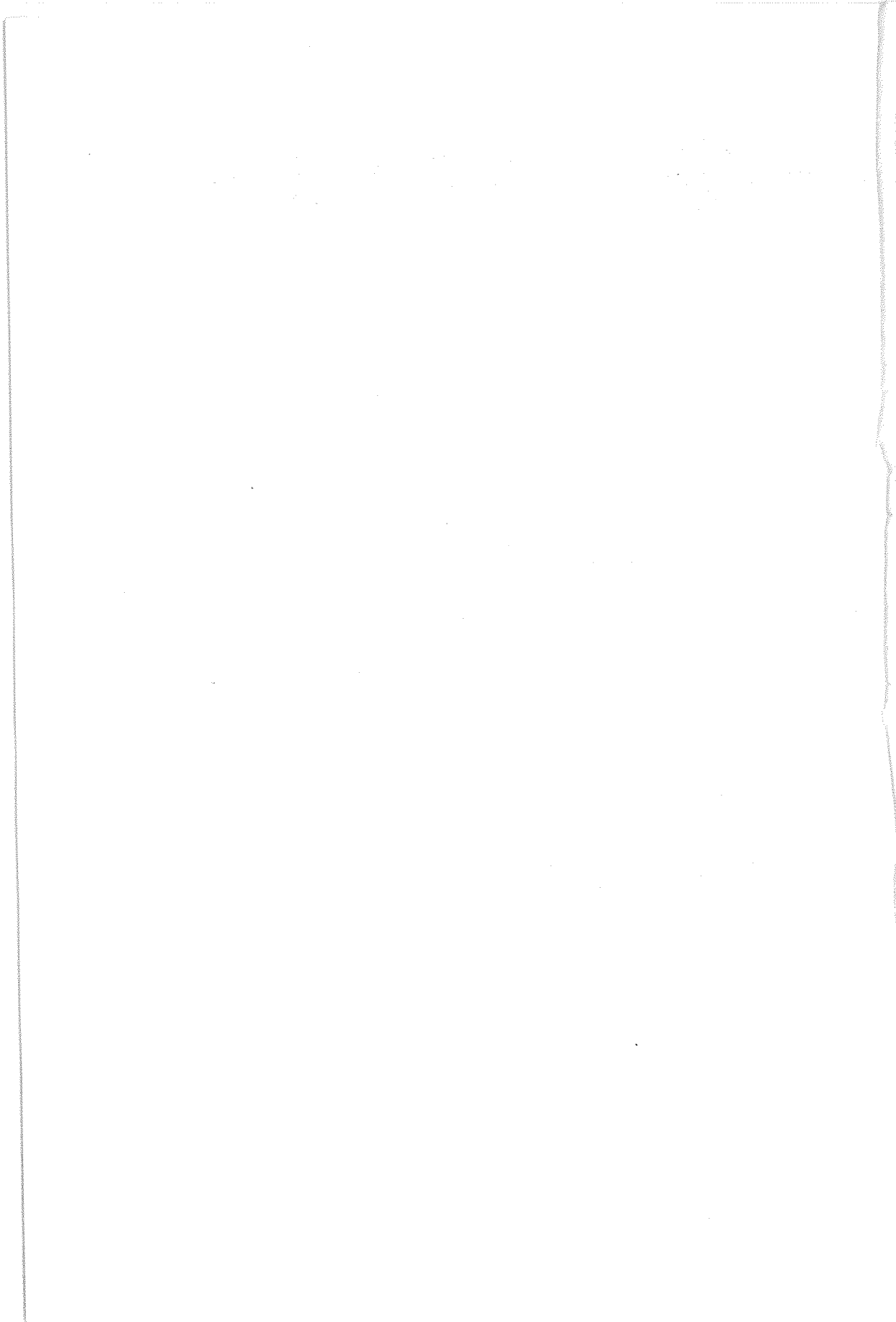
22 СОВЕТУВАЊЕ ЗА  
ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО  
НА ЈУГОСЛАВИЈА

ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ  
II  
ОБРАБОТКА СО ДЕФОРМАЦИЈА

Покровители : Комитет за индустрија и енергетика на СР Македонија  
Републичка заедница за научноистражувачка дејност на  
СР Македонија

Спонзор : СООТ Металски завод - Тито Скопје

Охрид, мај 1989



## СОДРЖИНА

V. Stoiljkovic	
NOVI IZAZOVI U OBRADI DEFORMISANJEM	1
B.Musafija	
UTICAJ PROCESA DEFORMACIONOG OČVRŠĆAVANJA NA TEHNOLOGIJU HLADNOG PREOBLIKOVANJA	19
B. Devedic	
JEDAN NOV PRISTUP PRI ODREĐIVANJU DEFORMABILNOSTI LIMOVA U USLOVIMA SLOŽENE ISTORIJE DEFORMISANJA	27
V.Vujovic	
POTENCIJAL DEFORMABILNOSTI I NJEGOVO KORIŠĆENJE	37
В.Стрезов, Ј.Лазареv	
ПРИЛОГ КОН ПРОУЧУВАЊЕТО НА НАПОНСКАТА СОСТОЈБА ПРИ ФИНОТО ПРОСЕЧУВАЊЕ	46
D.Vilotić	
PRIKAZ METODE EKSPERIMENTALNOG ODREĐIVANJA DEFORMACIONOG STANJA	57
M.Jurković	
ODREĐIVANJE GRANIČNE DEFORMABILNOSTI METALA U FUNKCIJI NAPONSKIH STANJA	65
K.Kuzman, B.Ule, D.Zalar	
OCENA SPOSOBNOSTI ŽICE ZA PREOBLIKOVANJE V HLADNEM STANJU	75
K.Kuzman, Z.Kampuš	
ENERGETSKO VREDNOTENJE OBDELOVALNIH PROCESOV	85
M.Stefanović, D.Adamović, M.Mitrović	
MODELIRANJE TRIBO-USLOVA PRI IZVLAČENJU SA STANJENJEM ZIDA KOMADA	93
M.Stefanović, S.Aleksandrović	
POGODNOST KORIŠĆENJA LIMOVA POVIŠENE ČVRSTOĆE PRI DUBOKOM IZVLAČENJU SA ASPEKTA NAKNADNOG OJAČANJA STARENJEM	101

V.Krušić	
ANALIZA PROCESA ISTOSMERNEGA IZTISKAVANJA PASTORKA V POGOJH REDNE PROIZVODNJE	109
M.Math	
PRIMJENA JEDNE INKREMENTALNE ANALITIČKE METODE PRI KOVANJU AKSIJALNO SIMETRIČNOG TIJELA	117
V.Mitković	
PRILOG ODREĐIVANJU PREDZNAKA IZVODA POMERANJA PO KOORDINATI DOBIJENIH METODOM MOAR	125
V.Mitković	
ODREĐIVANJE PARAMETARA U PROCESU ODSECANJA PUNIH OKRUGLIH PROFILA	131
I.Potrč, P.Leš, I. Glušić	
MODELIRANJE SLOBODNOG STISKANJA KRUŽNOG I PRAVOKUTNOG ČELIČNOG PROFILA POMOĆU METODE RUBNIH ELEMENATA	137
B.Rančić	
SILA ZATVARANJA ALATA PRI OBLIKOVANJU NESTIŠLJIVIM FLUIDOM DELOVA SA BOČNIM ODVODIMA	145
B.Rančić	
ODREĐIVANJE RADNOG PRITISKA I SILA PRI OBLIKOVANJU T-RAČVE SA SUŽAVANJEM ODVODA	153
S.Hasanbegović	
ANALIZA TANGENCIJALNIH NAPONA PROCESA IZVLAČENJA ELIPTIČNIH TIJELA	161
S.Urošević	
PRILOG ISTRAŽIVANJU EKONOMIČNOSTI TIP PROCESA	169
V.Marinković	
ANALIZA MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA PROCESA REDUCIRANJA U VIŠE OPERACIJA	177
L.j.Bogdanov	
PRILOG APLIKACIJI POSTUPKA IZOSTATIČKOG PRESOVANJA ZA DOBIJANJE NOVIH MATERJALA I POBOLJŠANJE MEHANIČKIH OSOBINA OBLIKOVANIH IZRADAKA	185

Lj.Bogdanov, P.Popović, S.Marković INOVIRANJE POSTUPKA IZRADE RADNOG KOLA HAVARIJSKE PUMPE ZA NUKLEARNE ELEKTRANE PRIMENOM POSTUPKA IZOSTATIČKOG PRESOVANJA	193
M.Sendić, I.Sušić IZRADA OZLJEBLJENIH VRATILA POSTUPKOM HLADNOG PROFILNOG VALJANJA	201
D.Lazarević, Lj.Janković DIMENZIJE KALPNE ŠUPLJINE ZA IZRADU ZUPČANIKA OD PLASTOMERA UBRIZGAVANJEM	207
I.Todorovski, Ž.Marković ISPITIVANJE KVALITETA REPARATURNI NAVARENIH VALJAKA ZA TOPLO VALJANJE LIMOVA	215
Ž.Popović, M.Jovičić UTICAJ TEHNOLOŠKOG ZAZORA I USLOVA OBRADJE PRI PROSECANJU NA HABANJE RADNIH ELEMENATA ALATA U VISINI IZDIGNUTE IVICE IZRADAKA OD Cu-Zn-Ni LEGURE	225
T.Todić OCENA POSTOJANOSTI REZNIH ELEMENATA ALATA ZA PROSECANJE I PROBIJANJE	233
D.Nikolić OSNOVNI PROBLEMI UPRAVLJANJA OBRADNIM SISTEMIMA ZAPREMINSKOG OBLIKOVANJA PLASTIČNIM DEFORMISANJEM	241
Ž.Mažuran, T.Šurina FLEKSIBILNO POSTROJENJE ZA KOVANJE SITNIH OTKIVAKA	249
D.Nikolić SISTEMI UPRAVLJANJA MAŠINAMA ZA ZAPREMINSKO OBLIKOVANJE PLASTIČNIM DEFORMISANJEM	259

*[Faint, illegible vertical text on the left edge of the page]*

*[Faint, illegible text filling the majority of the page, possibly bleed-through from the reverse side]*

V. Stoiljković\*

## NOVI IZAZOVI U OBRADI DEFORMISANJEM

### 1. UVOD

Treća tehnološka revolucija zasnovana je na informatici, mikroelektronici i fleksibilnim proizvodnim sistemima. Proizvodnja podržana računarom - CIM (Computer Integrated Manufacturing), novi materijali i nove tehnologije predstavljaju vidljivi progres čovečanstava. Ovaj progres je obuhvatio sve oblasti čovekovog života i rada, pa medju njima i oblast obrade deformisanjem. Ova oblast, dugo smatrana empirijskom, doživela je svoj napredak najpre u teorijskom delu kroz primenu stavova teorije plastičnosti za opis procesa deformisanja materijala, a u novije vreme i progres u sve većoj podršci ovih tehnologija računarom.

U ovom radu se rasmatraju nove mogućnosti ispitivanja obradivosti materijala uz korišćenje najsavremenijih metoda merenja podržanih računarom, kao i ispitivanja samih procesa i mašina primenom istih metoda. Pored toga, rasmatraju se nove tehnologije zasnovane na korišćenju nestišljivog fluida za prenos deformacione sile. Ove tehnologije mogu da koriste fleksibilne alate, čime se znatno skraćuje vreme pripreme proizvodnje, kao i cena koštanja proizvoda. Na skraćenje vremena pripreme proizvodnje i povećanje pouzdanosti projektovanja tehnologije i alata, poseban značaj ima podrška tih funkcija računarom, odnosno uvodjenje CAD-/CAP-/CAM koncepta. Ovaj koncept, primenjen u oblasti obrade deformisanjem, je takodje predmet rasmatranja u ovom radu.

### 2. SNIMANJE POKAZATELJA OBRADIVOSTI I PROCESA OBRADE

Za tačno definisanje parametara procesa obrade deformisanjem izuzetno je važno da se tačno odrede karakteristike materijala,

---

\*/ Vojislav Stoiljković, dipl.ing., redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu, ul. Beogradska 14

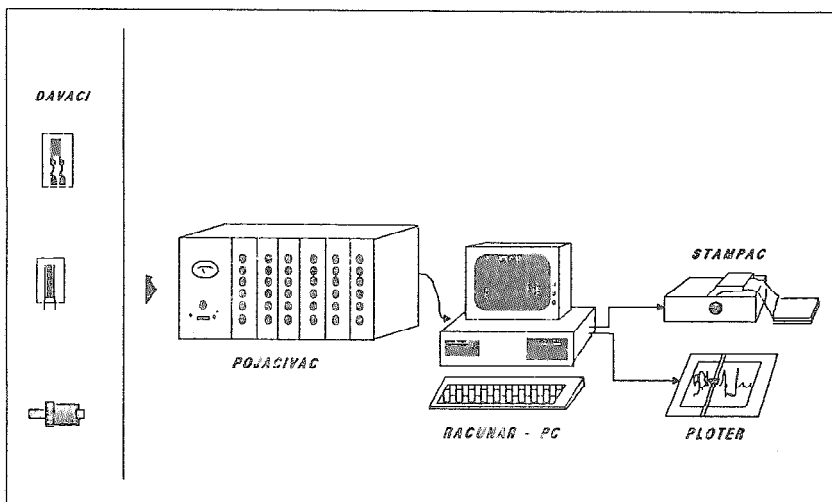


pokazatelji obradivosti, kao i granične deformacije. Za odredjivanje tih veličina koriste se različite metode. Zajedničko za sve metode ispitivanja je da se obezbedi što pouzdanije i tačnije snimanje traženih veličina. Jedna od najpouzdanijih metoda je metoda merenja mehaničkih veličina električnim putem. Ova metoda je već ugrađena u savremene kidalice i druge uređjaje za ispitivanja.

Metoda merenja mehaničkih veličina električnim putem [1] je u poslednje vreme podržana računarom, kako u delu snimanja promene odredjene veličine, tako i u delu obrade rezultata merenja. Prikaz jedne moguće konfiguracije sa PC računarom dat je na slici 1. Pored PC računara, koji ima dodatnu karticu, odnosno A/D konvektor, u konfiguraciji je printer, ploter i pojačivač. Na ulazu u pojačivač se priključuju različiti davači za snimanje napona i deformacije (merne trake), brzine, ubrzanja, pritiska, obrtnog momenta, sile itd. Koji će davači biti odabrani za merenje zavisi od postavljenih uslova merenja [2,3].

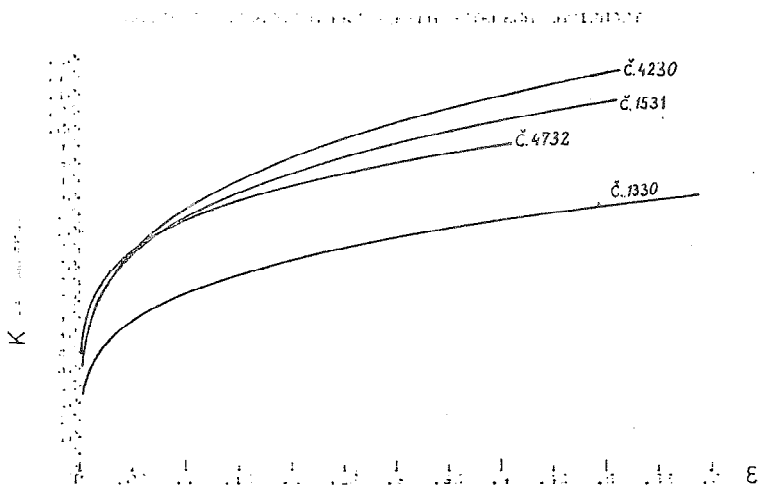
Napred opisana metoda koristi se na Mašinskom fakultetu za snimanje krivih očvršćavanja. Na klasičnu kidalicu dodaje se merna oprema prikazana na slici 1 i snimaju se karakteristike materijala ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) sve do trenutka prekida epruvete. Tako dobijeni rezultati merenja se obradjuju po posebnom software-u, koji omogućuje direktno dobijanje i crtanje krivih očvršćavanja. Takve krive očvršćavanja, s obzirom na mogućnost korišćenja uslova da kriva prodje kroz veći broj tačaka koje odgovaraju stvarnim uslovima očvršćavanja materijala, su znatno tačnije od krivih dobijenih klasičnim metodama snimanja [4]. Na slici 2 su prikazane krive očvršćavanja za neke materijale, dobijene na napred opisan način.

Napred opisana metoda može veoma uspešno da se primenjuje i za snimanje pokazatelja koji definišu proces obrade deformisanjem. Istovremenim snimanjem sile i puta, i obradom tih rezultata preko PC računara, dobijaju se dijagrami sila-put. Sa tih dijagrama je moguće, primenom stavova iz numeričke analize, odrediti deformacioni rad, stepen punoće dijagrama sile-put, kao i bilo koji drugi pokazatelj, koji je od značaja za istraživanje određenog procesa obrade. Time se stvaraju izvanredni uslovi za proveru teorijskih stavova.



Slika 1

MASINSKI FAKULTET NIS



Slika 2

### 3. NOVE TEHNOLOGIJE I FLEKSIBILNI ALATI

Tehnološka revolucija se karakteriše pojavom velikog broja tehnologija, koje su najčešće nastale kao posledica istraživanja u oblasti kosmosa, ali i kao posledica traženja puteva dobijanja što kvalitetnijih proizvoda sa nižom cenom i kraćim rokom osvajanja. Pojava novih tehnologija je od posebnog značaja u oblasti obrade deformisanjem, gde se radi o specijanim alatima, čije su cene veoma visoke. Iznalaženjem tehnologija koje omogućavaju primenu fleksibilnih alata, znači znatno skraćenje vremena izrade alata, ali i njegove cene koštanja. Nemoguće je da se u jednom radu dotaknu sve nove tehnologije koje su se pojavile poslednjih godina. Ovde će se posvetiti pažnja samo novim tehnologijama obrade lima kod kojih se koristi nestišljiv fluid.

Postupci obrade lima deformisanjem mogu se podeliti, prema stanju medijuma za prenos energije, u četiri klase [4]. Pored prve klase, koja predstavlja konvencionalne postupke sa čvrstim delovima alata, poslednjih godina sve više nalaze primenu i postupci u kojih je fluid nosilac deformacione sile, dok se oblik odredjuje prema čvrstom kalupu (druga klasa), ili prema čvrstom oblikaču (četvrta klasa) [4]. Zamenom pojedinih čvrstih delova alata stišljivim, ili nestišljivim fluidom, stvoreni su uslovi da alati postanu fleksibilni. Naime, u istom alatu mogu da se izradjuju delovi od lima različite debljine. Promenom samo kalupa, kod druge klase, ili oblikača, kod četvrte klase, dobijaju se i drugi oblici delova u istom alatu.

Na Mašinskom fakultetu u Nišu se nove tehnologije oblikovanja fluidom istražuju skoro dvadeset godina, posebno u delu druge klase. Ovaj postupak, u svom najopštijem pristupu, prikazan je na slici 3a i b. Početni pripremak se stavlja na donji deo alata, preko izvlačača (slika 3a). Pomeranjem gornjeg dela alata, u kome je smešten fluid, naniže, dolazi do zatvaranja alata. Po zatvaranju alata, uključuje se donji cilindar, koji pomera dva izvlačača naviše. Usled pomeranja izvlačača, dolazi do oblikovanja lima prema obliku izvlačača, a pod dejstvom fluida pod pritiskom koji se nalazi u gornjem delu alata. Gornji deo alata ima ulogu kalupa u ovoj fazi izvlačenja. Ovakva kombinacija izvlačača i kalupa predstavlja četvrtu klasu izvlačenja [4].

Po dostizanju određene visine dela, zaustavlja se dalje

pomeranje izvlakača naviše. Pritisak fluida u gornjem delu alata se povećava, pa to dovodi do pomeranja srednjeg izvlakača iz prve faze naniže. Pri tome, taj deo alata preuzima ulogu pridržiivača (slika 3b). Spoljašnji deo izvlakača iz prve faze izvlačenja, u drugoj fazi postaje prsten za izvlačenje. Ovakva kombinacija izvlakača i prstena zapravo predstavlja drugu klasu izvlačenja [4]. Ceo postupak ima objedinjene dve operacije izvlačenja, pa je u literaturi poznat kao reverzibilno izvlačenje fluidom [5].

Postupak reverzibilnog izvlačenja fluidom prikazan na slici 3a i b može se, uz neznaten izmene, da prevede u: izvlačenje fluidom bez pridržiivača i izvlačenje fluidom sa pridržiivačem [4]. Prvi postupak se dobija izbacivanjem izvlakača iz prve faze prikazane na slici 3, a drugi pomeranjem oba izvlakača samo naniže, čime isti postaju pridržiivači (pri tome je logično da pridržiivač bude iz jednog dela). Koja će se varijanta izvlačenja fluidom primeniti, to zavisi od postavljenih zahteva, oblika dela, graničnih odnosa izvlačenja itd.

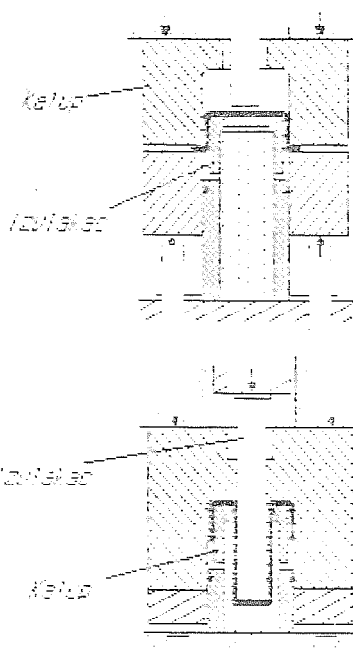
Reverzibilno izvlačenje fluidom, po varijanti koju je predložena i primenjuje se u Japanu, prikazana je na slici 4. Po ovom postupku prva faza izvlačenja (slika 4a) odgovara klasičnom izvlačenju uz dovodjenje fluida uz izvlakač. U drugoj fazi dolazi do prevrtanja već izvučenog dela naniže. Pri tome je izvlakač čvrst, a kalup je fluid pod pritiskom [9]. I u ovom postupku, kao i u napred opisanom reverzibilnom izvlačenju, koriti se fluid za oblikovanje lima. Pri tome druga faza oblikovanja odgovara četvrtoj klasi postupaka izvlačenja [4].

Primenom nestišljivog fluida za oblikovanje lima stvorene su mogućnosti korišćenja fleksibilnih alata. To se ogleda u sledećem:

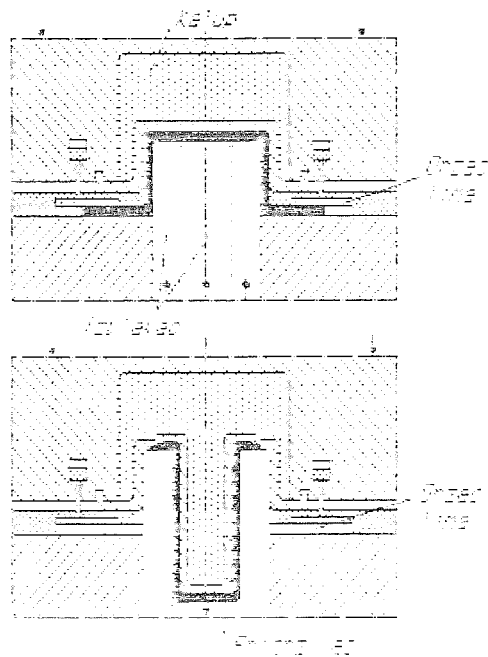
- u istom alatu mogu da se oblikuju limovi različitih debljina i kvaliteta;
- gornji deo alata može da se koristi za određeni dijapazon dimenzija delova, bez obzira na njihov oblik;
- promenom pridržiivača/izvlakača dobija se novi deo u istom alatu;
- promenom samo kalupa takodje može da se dobije novi deo itd.

Istraživanja novih tehnologija oblikovanja lima fluidom započela su 60-tih godina u svetu, a na Mašinskom fakultetu u Nišu 1970. godine. Tek 1975. godine su u Japanu napravljene hidraulične prese za oblikovanje lima fluidom [6]. Sa veoma malim

zakašnjenjem, 1978. godine, u saradnji sa Mašinskom industrijom u Nišu, napravljena je i prva domaća presa HPIF za oblikovanje fluidom.



Slika 3



Slika 4

Danas se u svetu [8,9], a i kod nas [4,5,6], oblikovanje fluidom dosta koristi u industriji za izradu delova aviona, karoserije automobila, aparata za domaćinstvo, industrije pneumatike, kao i svih složenih oblika koji drugim tehnologijama i ne mogu da se izraduju. Primenom ove tehnologije, zbog fleksibilnosti alata i mogućnosti ostvarenja većeg broja operacija u istom alatu [7,8,9], mogu da se ostvare uštede u odnosu na klasične tehnologije i do 90% [8]. Ako se ovome doda mogućnost podrške računarom u delu projektovanja tehnologije i alata, kao i u delu izrade alata (CAD-/CAP-/CAM), pri čemu kalupi mogu biti i od araldit mase, tada se dobija prava slika o nesluđenim

mogućnostima koje pružaju nove tehnologije, a među njima i tehnologija oblikovanja fluidom.

Nestišljivim fluidom mogu da se oblikuju delovi dimenzija od 30\*30\*30 mm do 1.200\*1.000\*250 mm. Debljine limova koje mogu da se obradjuju kreću se u granicama od 0,2 do 3,2 mm i više. Pri tome su ostvarljivi pritisci fluida u kalupu od 30 MPa do 150 MPa. Hidraulične prese se grade sa silama od 200 kN pa do 20.000 kN. Mašinska industrija u Nišu, po tehnologiji razvijenoj na Mašinskom fakultetu i uradjenoj dokumentaciji na fakultetu, izradjuje HPIF prese u širokom dijapazonu sila, dimenzija stolova i hodova.

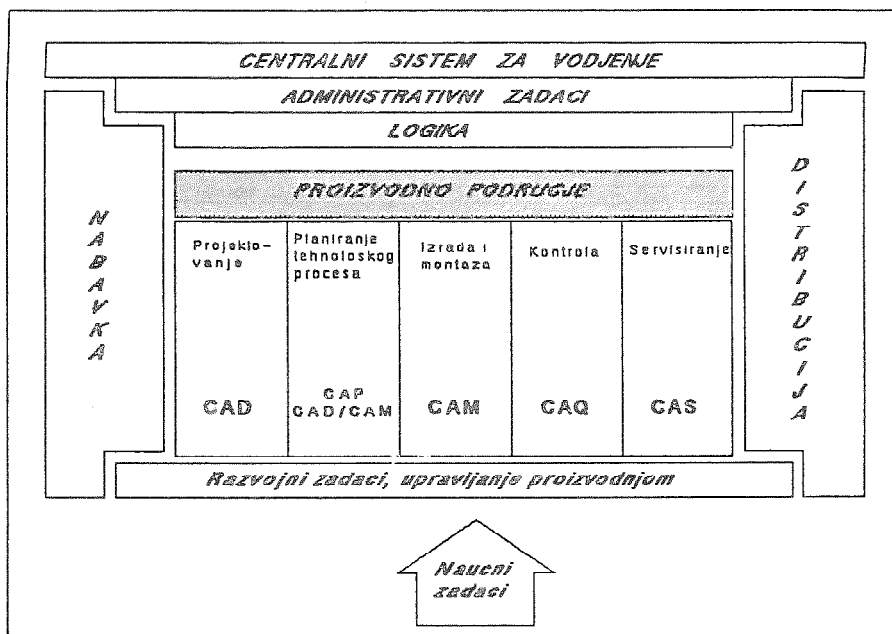
#### 4. CAD-/CAP/-CAM U OBRADI DEFOMISANJEM

CIM (Computer Integratet Manufacturing) i novi materijali menjaju proizvodnu tehniku. Nove informacione tehnologije predstavljaju osnovu za kompjutersko integrisanje svih aktivnosti u fabrikama CIM koncepta. Integrisani kompjuterizovani sistemi su bliska realnost. Oni treba da objedine tehnologije, opremu, organizacione jedinice i informacione resurse proizvodne organizacije [10].

U sistemu računarski integrisane i automatizovane proizvodnje kroz kombinaciju hardvera, softvera, banke podataka i sistema komunikacija, moguće je obezbediti kompletno upravljanje i koordiniranje svih funkcija u jednom preduzeću. Na slici 5 je prikazan jedan model preduzeća za CIM analize u mašinstvu [11]. Sistem za centralno vodjenje preduzeća objedinjuje razvojne i aministrativne zadatke od nabavke sirovina i delova iz kooperacije, pa do distribucije gotovih proizvoda. Unutar toga je proizvodno područje, koje je podržano računarima u svim vitalnim funkcijama proizvodnje. Pri tome je obezbedjeno i kompletno upravljanje proizvodnjom preko računara.

Napred prikazan CIM koncept preduzeća u mašinstvu, kompletno zaokružen, ili za početak samo sa nekim funkcijama (CAD/CAP/CAM), može da se primeni kako u velikim sistemima, isto tako i u srednjim i manjim firmama. Sve do 80-tih godina dominirala je primena CIM koncepta u velikim firmama. Medjutim, snižavanjem cene, pre svega hardvera, a potom i softvera, stvorili su se uslovi za primenu CIM koncepta i u manjim firmama. Ovaj trend je posebno izražen poslednjih godina.

U poslednje vreme intenzivno se uvodi pojam veštačke



Slika 5

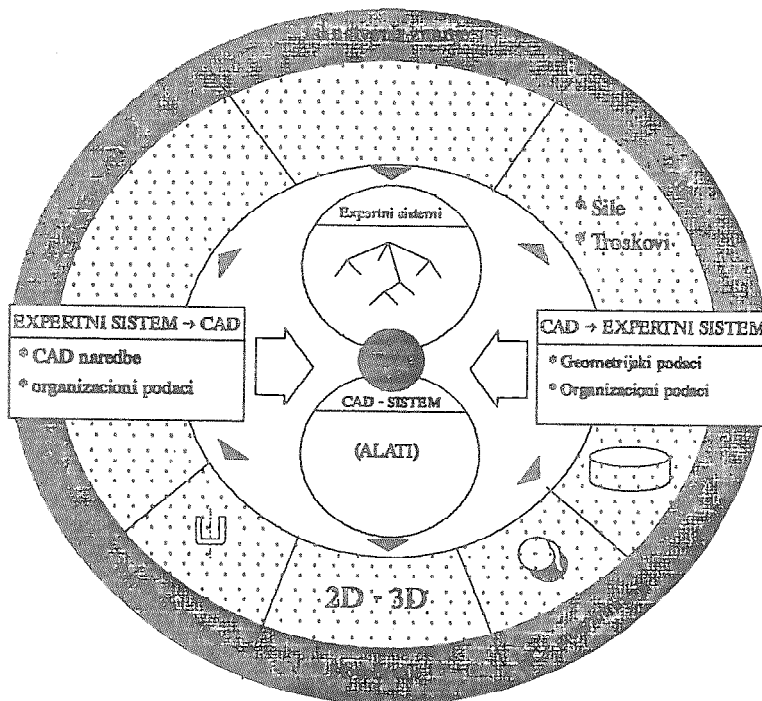
inteligencije, čiji su neposredni rezultati tzv. ekspertni sistemi [10]. Pomoću niza istraživanja i sakupljanja znanja i istustva na jednom mestu, dolazi se do puteva kako stručnjak logički razmišlja. Ti rezultati se smeštaju u memorije računara, da bi se kasnije korisili za konkretne slučajeve.

Oblast korišćenja ekspertnih sistema u području proizvodnje je veoma široka, ali što se tiče pojedinačnih sistema veoma ograničena. Ekspertne sisteme je svrsishodno koristiti tamo, gde se traži znanje eksperta u specijalnom području korišćenja, gde treba čovek da se oslobodi nekog zadatka ili da se potpomogne kod nekog zadatka i gde konvencionalni postupci računanja nisu dovoljni zbog kompleksnosti problema. Sigurno da nije svrsishodno koristiti ekspertne sisteme svuda tamo, gde moraju da se planiraju, upravljaju i nadgledaju manji, lako sagledivi postupci, koji se ponavljaju. Biće ekstremnih slučajeva, kod kojih bi bilo bolje korišćenje kako uobičajenog postupka računanja, tako i sistema na naučnoj osnovi. U tim slučajevima bi se trebalo

odlučiti za ekspertni sistem.

Korišćenje ekspertnih sistema je danas još ograničeno, naročito zbog nedostataka sposobnosti učenja, kao i zbog još potpuno nerešenog problema nepogrešivog reagovanja. Takođe se još ne može preuzeti potpuno upravljanje procesa i zbog nedostataka integracionih sposobnosti, npr. za dalju automatizaciju proizvodnje. S druge strane, već se danas može uvideti, da će ekspertni sistemi u budućnosti igrati sve veću ulogu [12].

Već danas se čine ozbiljni pokušaji povezivanja CAD i Ekspertnih sistema [13]. Na slici 6 je prikazan jedan zatvoreni sistem, koji se sastoji iz Ekspertnog i CAD sistema. Ekspertni sistem sadrži egzaktne i iskustvena znanja, koja do sada nisu bila uključena u CAD sisteme. Integracija tih znanja kroz povezivanje Ekspertnih i CAD sistema otvaraju se nesluđene mogućnosti daljeg razvoja.



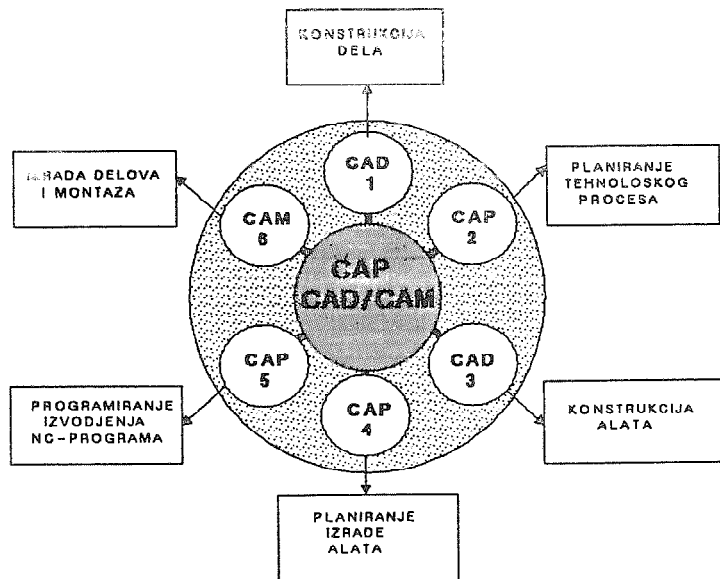
Veza CAD-sistema sa Ekspertnim-sistemom



#### 4.1. RAZVIJENI CAD-/CAP SISTEMI

Primena CAD/CAP/CAM sistema u obradi deformisanjem je veoma proširena poslednjih godina [14,15,16,17,18,19]. Ovi sistemi postepeno obuhvataju sve veći broj postupaka obrade deformisanjem. To je i razumljivo, jer su u tom području moguće i najveće uštede u delu pripreme proizvodnje. Jedan koncept koji se razvija na Mašinskom fakultetu u Nišu prikazan je na slici 7. Taj koncept obuhvata:

- CAD za konstruisanje dela koji treba da se dobije nekim od postupaka obrade deformisanjem;
- CAP za odredjivanje tehnološkog postupka izrade dela, odnosno za odredjivanje broja i redosleda operacija;
- CAD za konstruisanje alata za svaku operaciju;
- CAP za planiranje izrade alata;
- CAP za programiranje izrade delova alata, ali i dela koji se dobija deformisanjem, ako je reč o postupcima zapreminskog deformisanja, na numeričkim mašinama;
- CAM za izradu delova i montažu.



**CAD-/CAP-/CAM SISTEM U OBRADI DEFORMISANJEM**

Slika 7

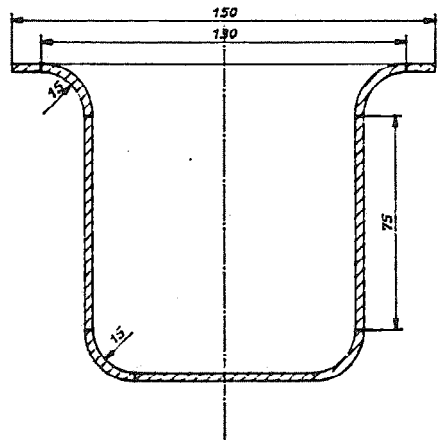
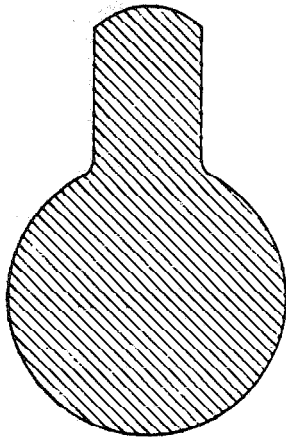
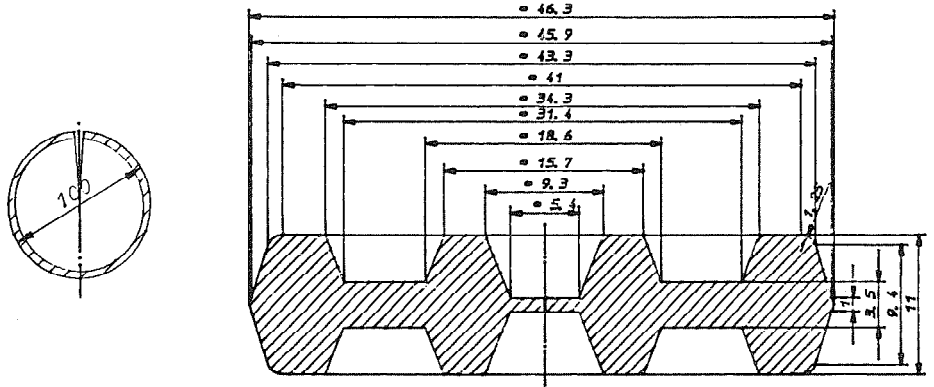
Prve tri funkcije u okviru prikazanog koncepta razvija grupa za obradu deformisanjem, a poslednje tri funkcije grupa za obradu rezanjem [20]. Iz okvira prve tri funkcije do sada su razvijeni sledeći CAD-/CAP sistemi:

- ICRD za izvlačenje cilindričnih rotacionih delova;
- KOVAČ za kovanje osnosimetričnih otkovaka;
- PROFIL za profilisanje cevi i profila na linijama za profilisanje i
- PROPRO za prosecanje i probijanje.

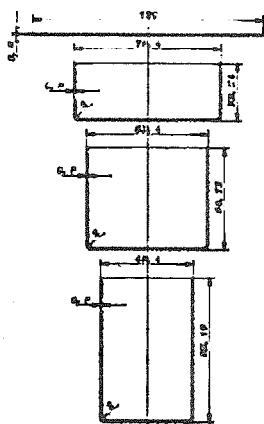
Svi navedeni sistemi, kao aplikativni grafički programi koriste za osnovni grafički sistem PLOT10-STI. Struktura tih sistema se sastoji od predprocesora, jezgra i postprocesora [18]. Predprocesor služi za unos topologije i dimenzije dela koji treba da se izradi nekim od postupaka obrade deformisanjem, kao i ostalih podataka koji definišu taj deo. Jezgro obezbedjuje, po usvojenom matematičkom modelu potpuno definisanje svih parametara koji određuju postupak obrade, uključujući izbor mašina, pripremu proizvodne dokumentacije i ekonomske pokazatelje. Najzad, postprocesor omogućuje izdavanje alfanumeričke i grafičke dokumentacije koja je neophodna za izradu svih delova alata.

Korisnički interfejs je tako napravljen da omogućuje korišćenje navedenih sistema i od lica koja nisu stručnjaci za te oblasti obrade deformisanjem. Ukupno vreme projektovanja tehnologije i alata, kao i vreme izdavanja sve potrebne dokumentacije je svedeno na nekoliko sati, kada se radi o većem broju operacija potrebnih za izradu dela. U poredjenju sa klasičnim načinom projektovanja ta smanjenja su i do 90%. Ako se tome doda i daleko veća pouzdanost pri projektovanju, tačnija i savršenija izradjenja grafička dokumentacija, dobija se prava slika o neslućenim uštedama koje mogu da se ostvare primenom opisanog koncepta u obradi deformisanjem.

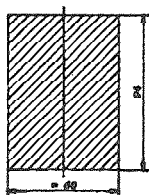
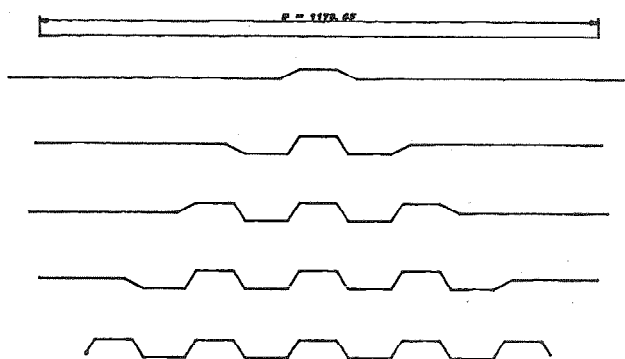
Na slici 8 su prikazani delovi koji se dobijaju postupcima izvlačenja, profilisanja, prosecanja i probijanja, kao i kovanja koji su projektovani primenom razvijenih CAD sistema. Za te delove je na slici 9 prikazan tehnološki postupak izrade odredjen takodje primenom razvijenog CAP sistema u okviru prikazanog koncepta. Najzad, na slici 10 i 11 su prikazani samo alati za izvlačenje i kovanje, zbog ograničenog prostora.



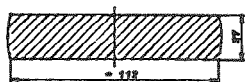
Slika 8



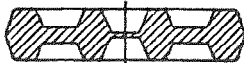
REZULTEAT CILINDRIČNEGA DELA PO OBRABILNIŠTU



Prizpremak

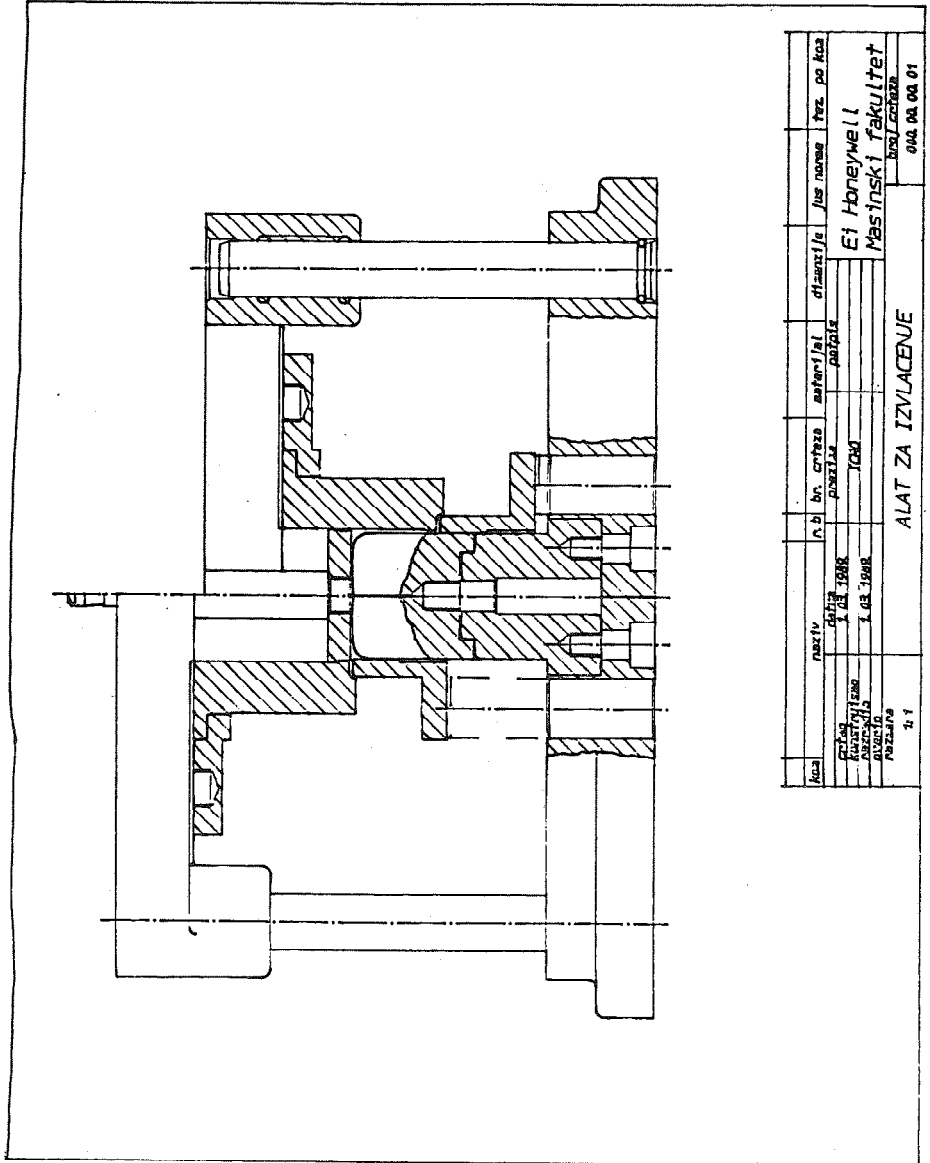


Pretkovak

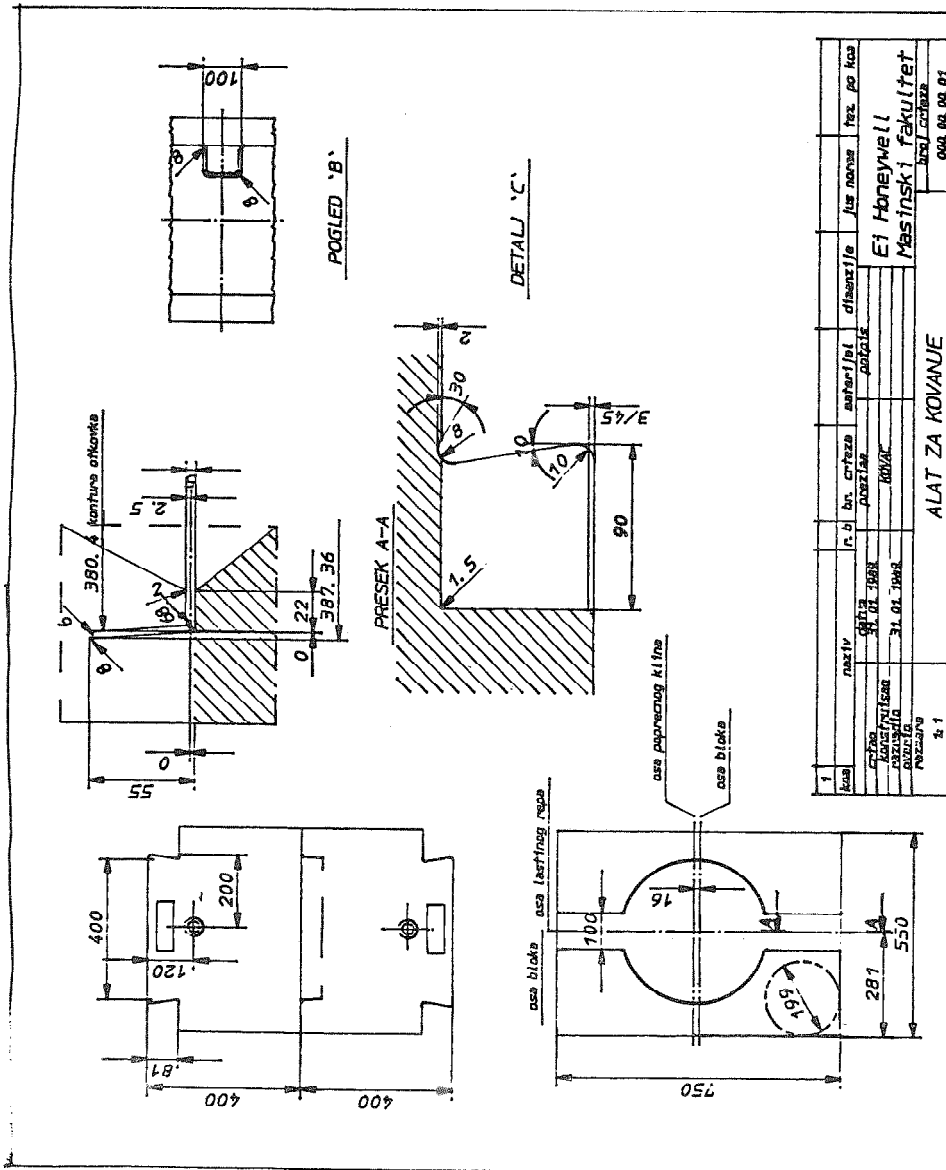


Otkovak

Slika 9



Slika 10



Slika 11

## 5. ZAKLJUČAK

CIM koncept predstavlja novu tehnologiju revoluciju u proizvodnji. Razvoj pojedinih zemalja počinje, između ostalog, da se određuje i prema nivou primenjivosti tog koncepta u proizvodnji. Procenjuje se da je u zapadnoj Evropi obuhvaćeno ovim konceptom već oko 25%, uz prognozu da bi 1992. godine taj procenat mogao da se poveća na čitavih 75%. Naša zemlja mora da učini napore u tom pravcu. Najvažniji deo resursa, a to je kadrovski potencijal, u dobroj meri postoji, samo ga treba staviti u pravi položaj. Dobiti koje se od uvođenja takvog koncepta mogu očekivati su vrlo veliki, kako u delu skraćenja pripreme proizvodnje, tako i u delu smanjenja drugih troškova uz povećanje kvaliteta.

### Reference

- [1] Stoiljković V.: Merenje mehaničkih veličina električnim putem, Univerzitet u Nišu, Niš, 1980.
- [2] Finckenstein E.: Prüfung der Kaltumformbarkeit von oberflächen edeltem Feinblech, Blech Rohre Profile 35(1988)12, str.1035-1039.
- [3] Dittrich B., Eike G.: Beurteilen de Umformeigenschaften oberflächen veredelter Bleche, Bänder Blech Rohre, 6-1988, str. 24-28.
- [4] Stoiljković V.: Teorija obrade deformisanjem, Univerzitet u Nišu, Niš, 1984.
- [5] Stoiljković V.: Industrijska izrada elemenata nestišljivim fluidom, Zbornik radova, XVII Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Budva, 1983., str.III/53-III/60.
- [6] Stoiljković V., Popović P., Šolaja V.: Druckbestimmung beim Tiefziehen von konischen Elementen mit Wirkmedien, Annals of the CIRP, Vol.27/1/1978., str.171-175.
- [7] Stoiljković V.: Analyse zylindrischer Elemente beim Tiefziehen mit Wirkmedien, Bänder Blech Rohre, 26(1985)3, str.73-77.
- [8] Mindrup W.: Flexible wirtschaftliche Blechumformung für Muster-, Prototypenbau von kleinserienfertigung im Automobilbau, Blech Rohre Profile 35(1988)10, str.794-798.
- [9] Nakamura K.: Sheet Metal Forming with Hydraulic Counter Pressure in Japan, Annals of the CIRP Vol.36/1/1987., str. 191-194.
- [10] Stoiljković V.: Izazovi novih tehnologija podržanih

- računarom, Zbornik radova sa naučno-stručnog skupa, Mašinski fakultet Niš, novembar 1988.
- [11] Bözling D.: Kennzahlenorientierte Unternehmensplanung für CIM -Tehnologien, Industrie-Anzeiger 63/64/1988.,str.44-45.
- [12] Troeder C.: Die intelligente Fabrik, Industrie-Anzeiger 84/1987.,str.8-11.
- [13] Eversheim W.,Neitzel R.: Wissensbasierte Konstruktion von Baukastenvorrichtungen, Industrie-Anzeiger 23/1988.,str.24-27.
- [14] Bramley A., Davies B.: Computer Aided Forging Design, Annals of the CIRP Vol.36/1/1987.,str.136-138.
- [15] Tisza M.: A CAD/CAM System for Deep-Drawing Processes, Advanced Tehnology of Plasticity, vol.I, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1987.,str.145-152.
- [16] Integration of CAD/CAM/CAE in an Aerospace Forging Company, Advanced Tehnology of Plasticity, vol.I, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1987.,str. 161-167.
- [17] Stoiljković V., Krstić M.: KOVAČ 2-The program system for Computer Aided Design of Forging Tehnology and Tools, International Conference on Advaced Manufacturing system and Tehnology, AMST-87, Opatija, str.227-234.
- [18] Stoiljković V., Mitrović D.: ICRD - A CAD system for Deep Drawing, Automatika 29(1988)1-2,A.219-A.227.
- [19] Stoiljković V., Stevanović D., Mitrović D.: PROFIL - programski sistem za automatsko projektovanje tehnologije i alata za profilisanje, Zbornik radova JUREMA 33(1988),Svezak 4,str. 191-194.
- [20] Domazet D.,Manić M.: Koncept CIM sistema za rotacione delove - CIMROT, Jupiter Konferencija, Cavtat, februar 1989.



## DIE NEUEN TENDENZEN BEIM UMFORMEN

### Zusammenfassung

Die dritte technologische Revolution ist in der Informatik, Mikroelektronik und in den flexiblen Herstellsystemen begründet. Die rechnerunterstützte Herstellung - CIM (Computer Integrated Manufacturing), die neuen Werkstoffe sowie die neuen Technologien stellenden sichtbaren Fortschritt der Menschheit dar. Dieser Fortschritt umfasst alle Arbeits- sowie Lebensgebiete der Menschen, sowie das Umformgebiet. Dieses Gebiet, das lange als empirisch bezeichnet wurde, erlebte seinen Fortschritt zuerst im theoretischen Teil und zwar durch Verwendung von Stellungnahmen der Plastiktheorie zur Beschreibung von Werkstoffumformen und in der letzten Zeit auch Fortschritt in den rechnerunterstützten Technologien.

In dieser Arbeit werden die neuen rechnerunterstützten Prüfmöglichkeiten der Materialbearbeitkeit, sowie die rechnerunterstützte Prüfung der Verfahren und der Maschinen betrachtet. Es werden auch die neuen Technologien, die in Verwendung von Wirkmedien zur Übertragung der Umformkraft, begründet sind, betrachtet. In diesen Technologien können die flexiblen Werkzeuge Verwendung finden, wodurch die Zeit zur Vorbereitung der Herstellung, sowie der Preis gespart werden. Für die Verkürzung der Zeit sowie für die Erhöhung der Zuverlässigkeit von Projektieren der Technologie und der Werkzeuge ist die rechnerunterstützte Konzeption, sowie die Einführung von CAD/CAM entscheidend. Diese Konzeption auf dem Gebiet der Umformtechnik wird in dieser Arbeit auch betrachtet.

B. Musafia \*

UTICAJ PROCESA DEFORMACIONOG OČVRŠĆAVANJA  
NA TEHNOLOGIJU HLADNOG PREOBLIKOVANJA

## 1. U V O D

Savremeni pristup tehnologijama plastične obrade bazira na naponsko-deformacionom stanju u zoni preoblikovanja i makro-reološkom modelu probnog materijala [1].

Procesi sa raznoimenom naponskom šemom, pri plastičnoj redukciji u hladnom stanju realizuju se u uslovima deformacionog očvršćavanja metala [2].

Za analizu osnosimetričnog izvlačenja (sl. 1a) pogodno je koristiti sferični koordinatni sistem, pa je ravnotežna konstelacija data sistemom od dvije parcijalne diferencijalne jednačine [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \tau_{\varphi\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{\varrho} [2\sigma_{\varphi} - (\sigma_{\theta} + \sigma_{\varphi}) + \tau_{\varphi\theta} \operatorname{ctg} \theta] &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{\varphi\theta}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{\varrho} [3\tau_{\varphi\theta} + (\sigma_{\theta} - \sigma_{\varphi}) \operatorname{ctg} \theta] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Sa formalno matematskog gledišta problem integracije se razriješava pridodavanjem uslovne jednačine plastičnog tečenja.

## 2. DEFORMACIONO OČVRŠĆAVANJE

Kod režima obrade pri temperaturama nižim od temperature oporavljanja, specifični deformacioni otpor raste kao monotona funkcija stepena deformacije.

\* Dr Binko Musafia, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Sarajevu, ul. Omladinsko šetalište bb.

Analitička obrada procesa osnosimetričnog izvlačenja uključuje zavisnost specifičnog deformacionog otpora od logaritamske deformacije trećeg reda u obliku [4]:

$$k = k(\varphi) = k_m \left( \frac{\varphi}{\varphi_m} \right)^n = \frac{k_m}{\varphi_m^n} \left( \ln \frac{A_0}{A} \right)^n \quad (2)$$

pri čemu se pokazatelji plastičnosti ( $\varphi_m$ ,  $k_m$ ), te eksponent očvršćavanja ( $n$ ) iznalaze kao eksperimentalni parametri mehaničkih osobina metala.

Reducirana vrijednost specifičnog deformacionog otpora u funkciji od kontrakcije presjeka, predstavlja ujedno i moć nošenja (sl. 2) u zoni prenosa sile procesa redukcionog izvlačenja [5]:

$$k_r = \frac{2}{\sqrt{3}} k(\psi) = k_{r0} + (k_{rm} - k_{r0}) \frac{\psi}{\psi_m} \exp \frac{1}{m} (\psi_m^m - \psi^m) \quad (3)$$

Probama linearnog istezanja, pored reducirane granice početka plastičnog tečenja ( $k_{r0}$ ), određuje se kontrakcija i stvarni napon ( $\psi_m$ ,  $k_{rm}$ ) predlokalizacionog stanja, dok je eksponent očvršćavanja ( $m$ ) njihova izvedena veličina.

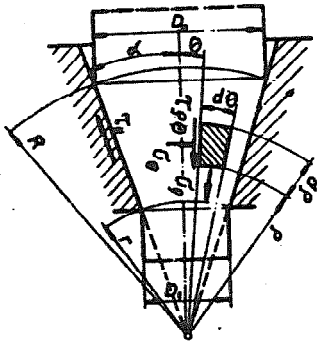
### 3. OSNOSIMETRIČNO IZVLAČENJE

Po kinematici radijalnog tečenja plastične mase u konusnom kanalu (sl. 1b), pretpostavlja se da su u zoni deformacije ( $r \leq \varrho \leq R$ ) brzine pomjeranja materijalnih tačaka usmjerene po radijusima ( $V_\varrho > 0$ ,  $V_\theta = V_\varphi = 0$ ), pa su komponente brzine deformacije isključive funkcije radijalne brzine pomjeranja [6]:

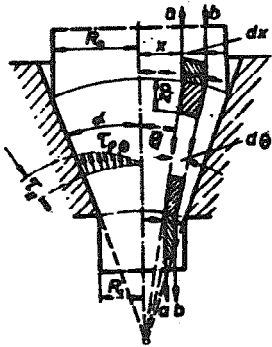
$$\xi_\varrho = \frac{\partial V_\varrho}{\partial \varrho}, \quad \xi_\varphi = \xi_\theta = \frac{V_\varrho}{\varrho}, \quad \eta_{\varrho\theta} = \frac{1}{\varrho} \frac{\partial V_\varrho}{\partial \theta} \quad (4)$$

S obzirom na deformaciono očvršćavanje (2) i radijalno tečenje (4), pri maksimalnoj simetriji naponskog stanja ( $\sigma_\theta = \sigma_\varphi$ ) jednačina plastičnog tečenja glasi:

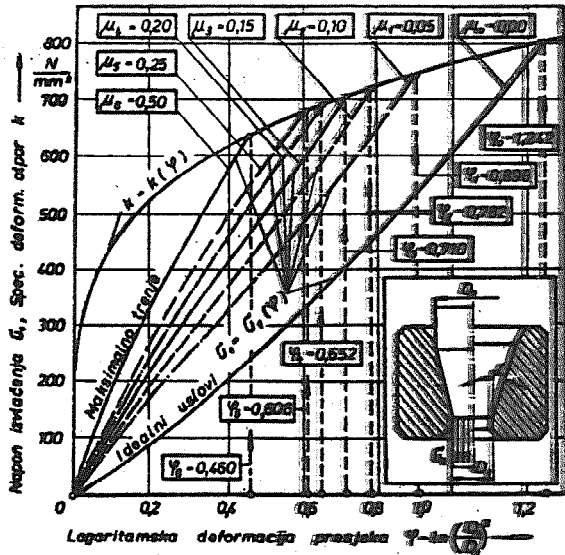
$$\left[ (\sigma_\varrho - \sigma_\theta)^2 + 3 \tau_{\varrho\theta}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = k_m \varphi_m^{-n} \left( 2 \ln \frac{R}{\varrho} \right)^n \quad (5)$$



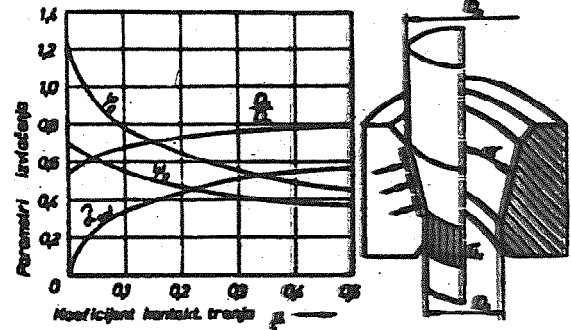
a. Naponska šema



b. Kinematika procesa



c. GRANICNE MOGUĆNOSTI PREDIŠTAVANJA IZVLAČENIEM



d. PARAMETRI OPTIMALNOG PROCESA IZVLAČENIA

Sl. 1. Osnosimetrično isvlačenje

Integracijom diferencijalne jednačine ravnoteže (1) i plastičnosti (5), uz pretpostavku linearne promjene tangencijalnog napona ( $0 \leq \tau_{\varphi} \leq \tau_k$ ) u intervalu od ose simetrije do kontakta ( $0 \leq \theta \leq \alpha$ ) dobiva se radijalni napon. Za optimalni ugao isvlačenja ( $\alpha = \alpha_{opt}$ ) mjerodavna je minimalna vrijednost napona ( $G_0 = G_1$ ) u izlaskom presjeku sone deformacije [7]:

$$G_1 = G_1(\varphi) = \frac{k_m}{\varphi_m^n (\varphi_m + 1)} \left[ \varphi^{n+1} + 2 \left( \frac{2}{3} \mu \varphi^{2n+1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

Vrlo uprošćeni prilaz problemu očvršćavanja predstavlja aproksimacija relacije (2) linearizovanom funkcijom stepena logaritamske deformacije [8].

Rješenjem jednačine deformabilnih mogućnosti materijala (2) i aksialnog napona procesu (6), dobiva se granični stepen logaritamske deformacije (sl. 1c) kao apscisa presječne tačke ovih krivih [9]:

$$\varphi_g = \ln(1 - \varphi_g)^{-1} = \varphi_m + 1 + \frac{4}{3} \mu - \left[ \frac{8}{3} \mu (\varphi_m + 1) + \frac{2}{3} \mu \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Uočava se (sl. 1d) da gubitak stabilnosti procesa formulisan relacijom (7) zavisi od bifurkacionih parametara materijala i triboloških uslova.

#### 4. REDUKCIONO IZVLAČENJE

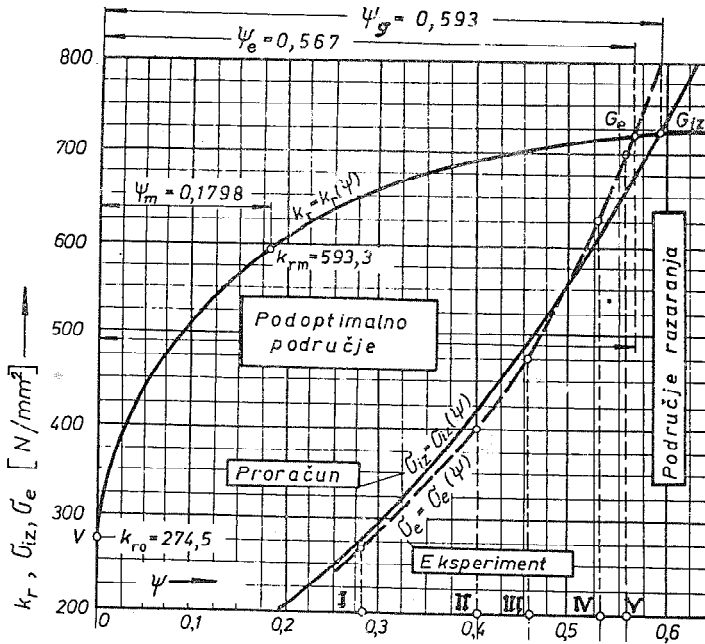
Za razliku od osnosimetričnog izvlačenja sa radijalnim tečenjem (4), proces dubokog izvlačenja sa redukcijom debljine zida (sl. 3), pod pretpostavkom održanja približno konstantne vrijednosti srednjeg prečnika, realizuje se sa nultom vrijednošću brzine pomjeranja čestica u pravcu jedne ose ( $v_y = 0$ ), što je karakteristika procesa ravninsko-deformacionog stanja. Komponente brzine deformacije u uslovima ravninskog tečenja [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \xi_y = 0 \\ \xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{array} \right., \quad \eta_{xz} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \quad (8)$$

Inače ravninski uslovi (8) nude mogućnost analitičke i eksperimentalne komparacije procesa izvlačenja i presovanja [11].

Jednačina plastičnog tečenja u ravninskim uslovima (8) i sa očvršćavajućim efektima izraženim funkcijom (3) glasi:

$$\left[ (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = k_{r0} + (k_{rm} - k_{r0}) \frac{\psi}{\psi_m} \exp \frac{1}{m} (\psi_m^m - \psi^m) \quad (9)$$



Sl. 2. Područje redukcionog izvlačenja

Integracijom diferencijalnih jednačina ravnoteže i plastičnosti dobiva se aksijalni napon kao funkcija parametara procesa i očvršćavajućih osobina metala. Za analizu je mjerodavna najveća vrijednost ovog napona ( $\sigma_z = \sigma_1$ ) u izlaznom presjeku zone deformacije.

Napon izvlačenja u izlaznom presjeku alata (sa zonom glaćanja visine  $h$ ) uključuje i dodatne gubitke kalibriranja vanjske površine izvučenog komada.

$$\sigma_{iz} = \sigma_1 \exp Gh - \frac{T-G}{G} k_r (\exp Gh - 1) \quad (1c)$$

gdje je:

$T$  - funkcija tribološke konstelacije

$G$  - funkcija geometrijskih odnosa zone kalibriranja.

Apscisa presječne tačke  $G_{1g}$  krive moći noženja (3) sa krivom napona izvlačenja (10) valorizira graničnu vrijednost stepena deformacije ( $\psi_g = 0,593$ ).

## 5. EKSPERIMENTI

Za eksperimentalnu analizu procesa osnosimetričnog izvlačenja korišten je mesing Cu 58 Zn Pb sa predbifurkacionim parametrima:

$$n = \psi_m = 0,242; \quad G_m = 426,9 \frac{N}{mm^2}; \quad k_m = G_m \exp \psi_m = 543,5 \frac{N}{mm^2}$$

Varirajući koeficijent kontaktnog trenja u intervalu od nulte do maksimalne vrijednosti ( $0 \leq \mu \leq 0,5$ ) uočava se (sl. 1c), da pri relativno nižem porastu aksialnog napona (u procentualnom iznosu od  $\Delta G_1 = 20,7\%$ ), dolazi do znatnijeg povećanja graničnog stepena logaritamske deformacije ( $\Delta \psi_g = 62,9\%$ ).

Deformaciono očvršćavanje i povoljniji tribološki efekti utiču direktno na proširenje intervala stabilnog procesa osnosimetričnog izvlačenja.

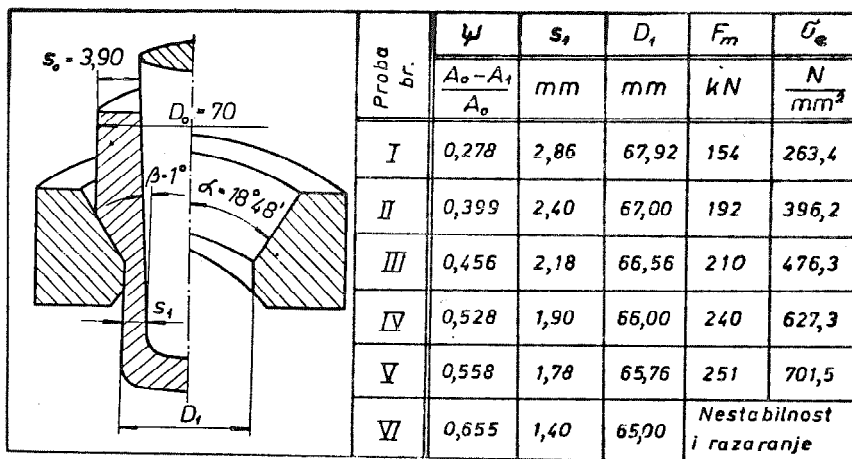
Probni uzorci procesa redukcionog izvlačenja (sl. 3) rađjeni su od čelika Č.1220 sa parametrima mehaničkih osobina

$$k_{ro} = 274,5 \frac{N}{mm^2}; \quad \psi_m = 0,1798; \quad k_{rm} = 593,3 \frac{N}{mm^2}$$

i eksponentom krive očvršćavanja drugog reda  $n = 0,3048$ .

Eksperimentalna granica gubitka stabilnosti procesa  $G_g$  (sl. 2) razdvaja interval obrade na dva dijela, s tim što je u podoptimalnom području ( $\psi < \psi_g$ ) obrada neracionalna, dok je u nadoptimalnom području ( $\psi > \psi_g$ ) obrada nemoguća.

Bliskost apscisa presječnih tačaka  $G_{1g}$  i  $G_g$  (sa procentualnim odstupanjem od  $\Delta \psi_g = 4,6\%$ ) potvrđuje da eksperimentalna vrijednost graničnog stepena deformacije ( $\psi_g = 0,567$ ) predstavlja ključni parametar procjene stabilnosti procesa redukcionog izvlačenja.



Sl. 3. Eksperimentalni podaci

## 6. ZAKLJUČAK

Fenomen deformacionog očvršćavanja, prisutan u svim tehnologijama prerade metala u hladnom stanju bitno utiče na konstelaciju naponsko-deformacionih odnosa.

Specifični deformacioni otpor, kao monotono rastuća funkcija stepena deformacije uslovljava povećanje moći nošenja u zoni prenosa sile.

Sprovedena teoretska i eksperimentalna analiza procesa osnosimetričnog i redukcionog izvlačenja pokazuje da zbog očvršćavajućih efekata dolazi do pomjeranja granice stabilnosti procesa.

## R e f e r e n c e

- [1] Gun G.J. Matematičeskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem "Metallurgija, Moskva, 1983. S. 8-14.
- [2] Musafia B. Optimizacija plastičnih procesa, Zbornik radova 20. Savjetovanja proizvodnog mašinstva "Proizvodne tehnologije", Beograd, maj 1986. S.127 - 132.
- [3] Ford H, Alexander J.M., Advanced Mechanics of Materials, Longmans London, 1963. S.613 - 618.
- [4] Dieterle K., Schröder G., Fließkurven, Lehrbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1972. 592-101.



- [5] Musafia B., Neke mogućnosti skraćanja procesa izvlačenja i presovanja, Zbornik radova JUREMA (33), svezak 4, BIAM '88, Zagreb 13 - 15. lipnja, 1988. S.179-182.
- [6] Sokolovskij V.V. Teorija plastičnosti, Izdateljstvo "Visšaja škola", Moskva, 1969, S. 478-484.
- [7] Musafia B., Fenomenološki razvoj plastične deformacije na putu opterećenja, Obrada deformisanjem u mašinstvu, godina 11, broj 1. Novi Sad, septembar 1986. S. 9-22.
- [8] Thomsen E.G., Yang C.T, Kobayashi S. Plastic deformation in Metal Processing, The Macmillan Company, New York, 1965, S. 418-423.
- [9] Musafia B., Maksimalna redukcija u operacijama izvlačenja, Zbornik radova BIAM '86, Zagreb, 1986. S. 268-271.
- [10] Durelli A.J., Phillips E.A., Tsao C.H., Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain, Mc Graw Hill Book Company Inc, New York, 1978. S.113-124.
- [11] Musafia B., Granične metode istraživanja procesa plastične redukcije, 21. Savjetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, Zbornik radova II, Opatija, listopad 1987. S. 57-63.

B. Musafia

INFLUENCE OF STRAIN HARDENING PROCESS  
ON THE COLD RESHAPING TECHNOLOGY

S u m m a r y

Technological processes of cold reshaping with heterogenous stress pattern are limited with the condition at which the plastic instability appears.

The paper presents the influence of strain hardening metals on the limiting possibilities.

In processes of axial symmetry and deep drawing the theoretical and experimental investigations of plastic instability criterion were performed in order to establish the limiting (critical) degree of deformation.

B. Devedžić\*)

ЈЕДАН НОВ ПРИСТУП ПРИ ОДРЕДЈИВАЊУ ДЕФОРМАБИЛНОСТИ  
ЛИМОВА У УСЛОВИМА СЛОЖЕНЕ ИСТОРИЈЕ ДЕФОРМИСАЊА

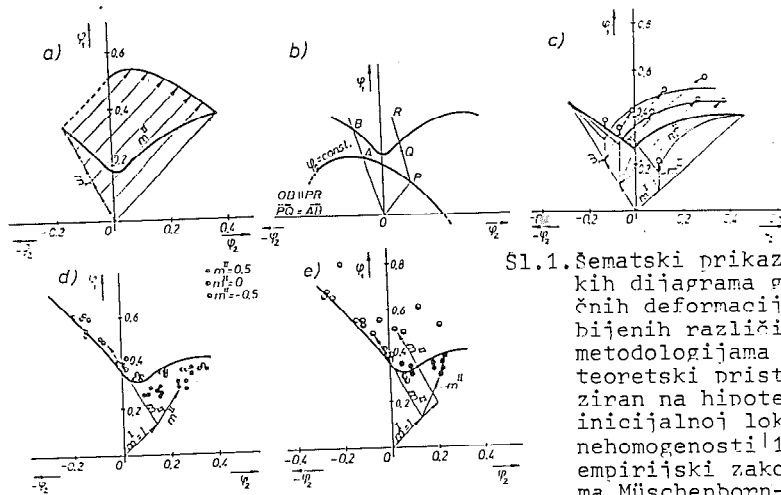
## 1. UVOD

Za sticanje svojevrsnog uvida u mogućnosti oblikovanja tankih limova često se koriste dijagrami granične deformabilnosti (DGD), koji predstavljaju zavisnost maksimalno ostvarive (granične) deformacije u ravni lima ( $\varphi_{1L}$ ) od njoj korespodentne manje deformacije ( $\varphi_2$ ). Karakteristično je, međutim, da se pri tome podrazumeva proporcionalno deformisanje u toku čitavog procesa, tj. da se odnos glavnih deformacija u kritičnoj zoni  $\varphi_2/\varphi_1 = m$  ne menja, pa se dobija pravolinijska putanja deformisanja ( $m = d\varphi_2/d\varphi_1 = \varphi_2/\varphi_1 = \text{const}$ ). Zbog toga korišćenje konvencionalnih DGD ima smisla samo u onim slučajevima obrade u kojima se u kritičnoj zoni takodje ostvaruje proporcionalno deformisanje. Međutim, u velikom broju slučajeva, naročito pri višeoperacionom oblikovanju, ne može se računati sa pravolinijskom putanjom deformisanja. Štaviše, ona je često i izrazito nemonotona. Reč je o složenim istorijama deformisanja.

U toku poslednjih 10-15 godina činjeni su brojni istraživački napor i sa ciljem da se dodje do generalnih pravila na osnovu kojih bi se mogla definisati granična deformabilnost u uslovima ovakvih istorija deformisanja  $\{1,2,3,4,5,\dots\}$ . Neki od tih pokušaja zasnivali su se na matematičkoj simulaciji realnih naponsko-deformacionih odnosa u toku procesa. Na primer, jedan pristup bazira na hipotezi o početnoj lokalnoj nehomogenosti u materijalu (sl. 1a) [1], ali se ispostavilo da tako dobijeni rezultati znatno odstupaju od eksperimentalnih. Ostali pristupi su, pretežno, zasnovani na empirijskoj metodologiji.

\*) Dr Branislav Devedžić, Dipl. Ing., redovni profesor Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul. Sestre Janjića 6

Müschenborn i Sonne [2] su pošli od pretpostavke da će na iznos granične ekvivalentne deformacije ( $\psi_{eL}$ ) bitan uticaj imati naponsko-deformacioni odnosi u zadnjoj fazi oblikovanja. Korišćenjem osnovnog (konvencionalnog) DGD i uz poznavanje putanje deformisanja, lako se dobijaju podaci za granične deformacije pri složenom deformisanju. Principijelno sličan pristup predložio je Arrieux [1]. On je takodje koristio osnovni DGD, ali radi određivanja ekvivalentnih napona i naponskih odnosa (umesto deformacionih), uključujući i one koje odgovaraju graničnim vrednostima. Poznati su i mnogi drugi pokušaji, činjeni sa istom ciljem, ali dobijeni rezultati ipak nisu doveli do pouzdanijih opštih rešenja, s obzirom na često vrlo velika neslaganja sa rezultatima eksperimentalne provere (sl. 1).



Sl. 1. Šematski prikaz nekih dijagrama graničnih deformacija dobijenih različitim metodologijama a) teoretski pristup (baziran na hipotezi o inicijalnoj lokalnoj nehomogenosti [1]; b) empirijski zakon (prema Müschenborn-u u Sonne-u [2]; c); d), e) eksperimentalno [2; 3]

Karakteristično je da je većina istraživača razmatrala uglavnom slučajeve nekontinualne pravolinijske putanje deformisanja sa ekstremnim usmerenjima, tj.  $\alpha = \sigma_2/\sigma_1 = 1$ , odnosno  $m = \varphi_2/\varphi_1 = 1$  i  $\alpha = 0$ , odnosno  $m = -0,5$ .

Iz svih ovih istraživanja može se izvući sledeći zajednički zaključak: kada deformacioni odnos  $m = d\varphi_2/d\varphi_1$  algebarski raste u toku procesa, onda se granična kriva pomera naviše u odnosu na osnovni DGD. Važi takodje i obrnuto.

Medjutim, ima i takvih zaključaka koji se ne mogu a prioniti prihvatiti. Na primer, u jednom radu se tvrdi da posle ravnomernog

dvoosnog razvlačenja do  $\varphi_1 = \varphi_2 \approx 0,2$  dalje deformisanje nije moguće!

## 2. PRISTUP ZASNOVAN NA STEPENU ISKORIŠĆENJA DEFORMACIONOG KAPACITETA

Za razliku od napred naznačenih polazišta za rešavanje problema granične deformabilnosti, ovde će se početi od nekih osnovnih saznanja u vezi sa procesima koji se odvijaju u diskretnoj strukturi materijala za vreme plastičnog deformisanja, tj. od fenomenološke teorije plastičnog razaranja.

Poznato je, naime, da se plastična dekohezija mikrostrukture može direktno povezati sa povećanjem specifične zapremine ( $\epsilon$ ), odnosno sa prvom invarijantom tenzora deformacije. Ako se prihvati da je povećanje dekohezije direktno proporcionalno ostvarenoj ekvivalentnoj deformaciji, biće:

$$d\epsilon = c d\varphi_e = c \dot{\varphi}_e d\tau$$

gde su:  $\dot{\varphi}_e$  - brzina ekvivalentne deformacije;  $\tau$  - vreme, a  $c$  - koeficijent proporcionalnosti koji karakteriše brzinu nastajanja i nestajanja mikro prskotina u strukturi.

Ne ulazeći na ovom mestu u detaljnije razmatranje ovih odnosa (koje je inače izvršeno od strane drugih autora - v. [6]), navešće se samo da se u uslovima nemonotonog procesa deformisanja može definisati uslov razaranja materijala preko koeficijenta iskorišćenja plastičnosti ( $q$ ) u vidu:

$$q = \int_0^{\tau_k} b(\tau) \frac{\dot{\varphi}_e d\tau}{\varphi_{eL} |\beta(\tau)|} = \int_0^{\varphi_{eL}} b \frac{d\varphi_e}{\varphi_{eL}} = 1$$

gde su:  $b(\tau)$  - koeficijent nemonotonosti procesa;  $\tau_k$  - kritičan trenutak vremena u kojem počinje razaranje materijala;  $\beta = 3\sigma_m/K$  - pokazatelj naponske šeme ( $\sigma_m$  - srednji normalni napon;  $K$  - deformacioni otpor);  $\varphi_{eL}$  - granična ekvivalentna deformacija, pri čemu je uopšte  $\varphi_{eL} = \varphi_{eL}$  (mater.;  $\tau$ ;  $\beta$ ;  $\dot{\varphi}_e$ ;  $t$ ;  $\mu_\sigma$ ;  $b$ );  $\mu_\sigma$  - Lode-ov koeficijent.

Ako su u pitanju sasvim određen materijal, kao i uobičajene brzine deformacije i temperature, onda će, uz zanemarivanje uticaja Lode-ovog koeficijenta, granična deformacija zavisiti samo od naponskog stanja i nemonotonosti procesa:

$$\varphi_{eL} = \varphi_{eL}(\beta; b) = \varphi_{eL}(\tau)$$

Kompleksan deformacioni proces se može podeliti u više (n) faza, pa će za i-tu fazu biti:

$$q^i = b^i \frac{\Delta \varphi_{eL}^i}{\varphi_{eL}^i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

a za čitav proces važi

$$q = \sum_{i=1}^n q^i$$

Neka se, na primer, radi o samo dve faze (I i II) i neka se 60% od odgovarajuće raspoložive granične deformacije za uslove prve faze  $\varphi_{eL}^I$  ostvaruje u okviru nje, onda će to istovremeno značiti da će se ostvariti i isti stepen oštećenja mikrostrukture (u odnosu na kritičan iznos). Ostatak ekvivalentne deformacije (40% u odnosu na  $\varphi_{eL}^{II}$ ) može se iskoristiti u drugoj fazi, pri čemu će se dekohezioni procesi odvijati brže ili sporije u odnosu na prvu fazu - zavisno od naponskog stanja i dr.

Shodno prednjim oznakama, biće u ovom slučaju  $q^I = 0,6$ , a zbog uslova razaranja  $q^I + q^{II} = 1$  dobija se  $q^{II} = 1 - q^I = 0,4$ .

Totalna deformacija, koja je istovremeno nova granična deformacija je:

$$\begin{aligned} \varphi_{1L}^T &= \varphi_1 + \varphi_1^{II} = \frac{\varphi_2^I}{m^I} + \frac{\varphi_2^{II}}{m^{II}} = q^I \varphi_{1L}^{II} + q^{II} \varphi_{1L}^{II} = \\ &= q^I \varphi_{1L}^I + (1 - q^I) \varphi_{1L}^{II} = \varphi_{1L}^{II} + q^I (\varphi_{1L}^I - \varphi_{1L}^{II}) \end{aligned}$$

a u najopštijem slučaju, kada se proces deli u n faza:

$$\begin{aligned} \varphi_{1L}^T &= \sum_{i=1}^n \varphi_1^i = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_2^i}{m^i} = \sum_{i=1}^n q^i \varphi_{1L}^i = \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} q^i \varphi_{1L}^i + (1 - \sum_{i=1}^{n-1} q^i) \varphi_{1L}^n = \\ &= \varphi_{1L}^n + \sum_{i=1}^{n-1} q^i (\varphi_{1L}^i - \varphi_{1L}^n) \end{aligned}$$

(mogućnost da se koristi  $\varphi_{1L}$  umesto  $\varphi_{eL}$  biće objašnjena u daljem).

Ovi odnosi su ilustrovani na sl. 2 - za slučaj  $b = 1$ , gde su prikazane nove granične krive za dvofazno deformisanje sa  $m^I = 1$  i  $-0,5 \leq m^{II} < 1$ , odnosno  $m^I = -0,5$  i  $-0,5 < m^{II} < 1$ .

Medjutim, ovako uprošćen pristup ne može biti sasvim zadovoljavajući, s obzirom na pomenuti značajan uticaj brzine nastajanja i oblika mikro-defekata u strukturi, naročito u prvoj fazi (odnosno uopšte u prethodnim fazama) deformisanja, kao i njihovog daljeg razvoja sve do katastrofalnog razaranja. U istom smislu ovde treba posmatrati i ostale karakteristike mikrostrukturnih defekata, kao što su: orijentacija, raspored, dislokacioni efekti, teksturne karakteristike, itd. Otuda i potreba za odgovarajućim korigovanjem, odnosno odredjivanjem vrednosti korekcionog faktora  $b \neq 1$ .

Korigovana vrednost granične deformacije u  $i$ -toj fazi  $\varphi_{eL}^*$  bila bi :

$$\varphi_{eL}^{i*} = \frac{\varphi_{eL}^i(m^i)}{b^i} \quad \text{odnosno} \quad q^i = \frac{\varphi_e^i}{\varphi_{eL}^{i*}}$$

gde je  $\varphi_{eL}^i(m^i)$  granična vrednost deformacije u  $i$ -toj fazi za slučaj pravolinijske deformacione putanje ( $m^i = \text{const}$ ), a  $b^i$  - odgovarajući korekcionni faktor za tu  $i$ -tu fazu.

Pretpostaviće se da se u okviru svake faze vrši proporcionalno deformisanje, pa će zato važiti sledeći odnosi koji omogućuju da se, umesto sa ekvivalentnim, radi sa glavnim deformacijama u ravni lima:

$$\varphi_1 = \frac{2-\alpha}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \varphi_e$$

$$\varphi_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\sqrt{1+m+m^2}} \varphi_1 = \psi_1(m) \varphi_e$$

Na primer, ako je u pitanju deformisanje u dve faze (I i II) sa  $m^I = \text{const}$  i  $m^{II} = \text{const}$ , dobija se:

$$\frac{\varphi_{eL}^I}{\varphi_{eL}^{II}} = \frac{\varphi_{1L}^I}{\varphi_{1L}^{II}} \sqrt{\frac{1+m^I+(m^I)^2}{1+m^{II}+(m^{II})^2}}$$

pri čemu se  $\varphi_{1L}^I$  i  $\varphi_{1L}^{II}$  mogu direktno odrediti na osnovu konvencionalnog DGD, kao vrednosti koje odgovaraju preseku ovog dijagrama i odgovarajućih deformacionih putanja.

Ova se pogodnost može koristiti i pri određivanju koeficijenta  $q^i$ :

$$q^i = \frac{\Delta\varphi_{eL}^i}{\varphi_{eL}^i} = \frac{\frac{\Delta\varphi_1^i}{\psi_1(m^i)}}{\frac{\varphi_{1L}^i}{\psi_1(m^i)}} = \frac{\Delta\varphi_1^i}{\Delta\varphi_{1L}^i}$$

a ako se koristi korekcionni faktor:

$$q^i = b^i \frac{\Delta\varphi_1^i}{\varphi_{1L}^i}$$

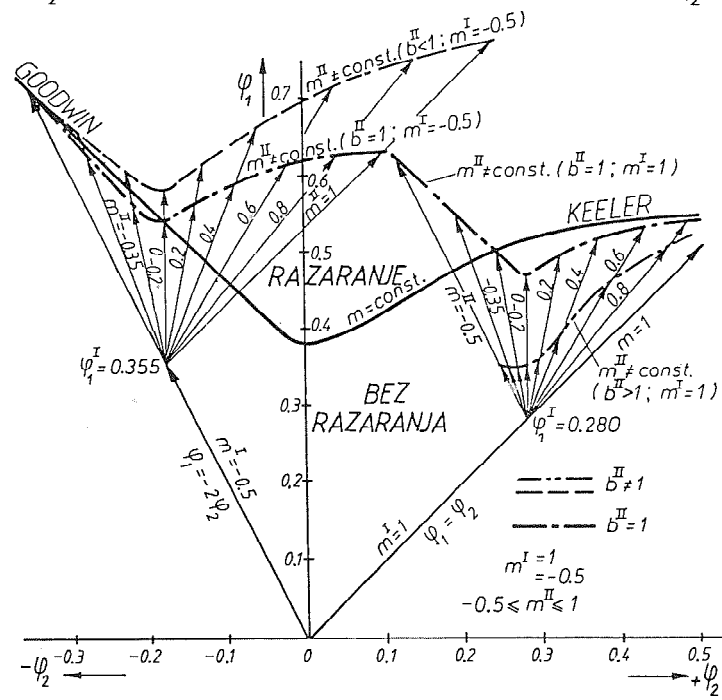
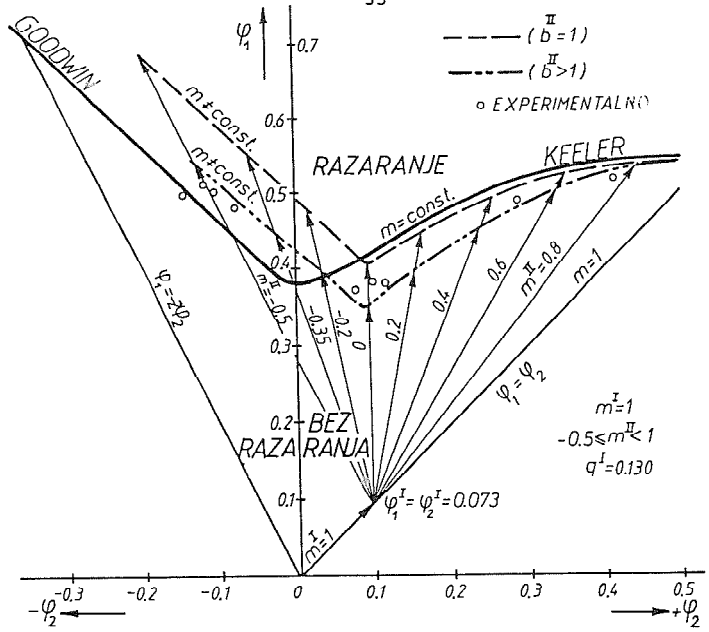
Na osnovu kritičkog razmatranja mogućih uticajnih činilaca koji predodredjuju vrednost korekcionnog koeficijenta  $b$ , autor je došao do zaključka da on prvenstveno zavisi od:

a) Promene naponskog stanja pri prelasku sa jedne na sledeću fazu deformisanja. Uzeće se da je pokazatelj ove promene  $|\alpha^{(i-1)} - \alpha^i|$ .

b) Vrednosti koeficijenta iskorišćenja deformabilnosti u prethodnoj fazi  $q^{i-1}$ , budući da sa njegovim povećanjem raste obim nastalih oštećenja u strukturi.

c) Vrednosti pokazatelja naponskog odnosa u prethodnoj fazi  $\alpha^{i-1}$ . Na osnovu dosadašnjih istraživanja poznato je da se proces dekohezije najbrže odvija kada je u prethodnoj fazi bilo  $\alpha^{i-1} = 1$ , a najsporije posle jednoosnog zatezanja, tj.  $\alpha^{i-1} = 0$ . Razloge za ovo treba tražiti u vrsti, orijentaciji, rasporedu strukturnih defekata i drugim karakteristikama dekohezije (deformacionom ojačavanju, teksturi, dislokacijama i dr.) koje zavise i od naponskog stanja. Tako nastali defekti predstavljaju polazno stanje za narednu (i-tu fazu), pa kao takvi bitno utiču na dalji proces dekohezije u okviru nje. Ovaj uticaj će se u dalje navedenom empirijskom obrascu, uzeti u obzir preko člana  $(1 + \alpha^{i-1})$ .

d) Nelinearnosti odvijanja dekohezionog procesa usled prednjeg efekta. Na primer, poznato je da je intenzitet ubrzanja nekih dekohezionih procesa najveći pri malim deformacijama, itd. Pretpostaviće se da je stepen ove nelinearnosti takodje prvenstveno zavistan od parametara  $\alpha^{i-1}$  i  $q^{i-1}$ , pa se može uzeti u ob-



Sl. 2. Primeri korigovanih i nekorigovanih DGD za dvofazni nemonotoni proces deformisanja



zir preko izraza:  $|1+\gamma(\alpha^{i-1})^k(q^{i-1})^l|$ .

Na osnovu ovakvog razmatranja dolazi se do empirijskog izraza za koeficijent  $\underline{b}$  u obliku:

$$b^i \approx 1+a(\alpha^{i-1}-\alpha^i)q^{i-1}(1+\alpha^{i-1})|1+\gamma(\alpha^{i-1})^k(q^{i-1})^l|$$

gde su:  $a, \gamma, k$  i  $l$  - konstante zavisne od svojstava materijala.

U nedostatku rezultata sopstvenih ispitivanja, korišćeni su objavljeni eksperimentalni rezultati nekih stranih autora [2] koji se odnose na eksperimentalnu proveru graničnih krivih, pa se na osnovu njih može, u prvom približenju, uzeti da je za slučaj čeličnog lima umirenog aluminijumom:  $a \approx 1/3$ ,  $\gamma \approx 20$ ;  $k \approx 3$ ;  $l \approx 1$ .

Dalja istraživanja bi eventualno mogla dovesti i do nešto izmenjenog izraza za  $b^i$ , pa se uopšte može pisati:

$$b^i = b^i(\text{mater.}, \alpha^{i-1}; \alpha^i, q^{i-1}).$$

Radi ilustracije međjusobnih odnosa konvencionalnih DGD, nekorigovanih oblika dijagrama za slučaj složene istorije deformisanja ( $b = 1$ ) i odgovarajućih korigovanih oblika ( $b \neq 1$ ), na sl. 2. navedeno je nekoliko primera do kojih se došlo primenom prikazanog postupka.

### 3. ZAKLJUČAK

1. Metodologija određivanja DGD na osnovu koeficijenta iskorišćenja plastičnosti, odnosno fenomenološke teorije plastičnog razaranja, bitno se razlikuje od ostalih pristupa pri rešavanju ovog problema.

2. Osnovni problem koji se javlja pri ovome jeste određivanje realne vrednosti korekcionog koeficijenta  $\underline{b}$ . Predložen empirijski obrazac za ovo određivanje treba shvatiti samo kao prvu, manje-više grubu, varijantu. Drugim rečima, potrebna su dalja istraživanja u ovom smislu, kako bi se predloženi odnosi potpunije proverili i, eventualno, korigovali.

3. Osnovni cilj ovog rada nije ni bio da se dodje do sasvim pouzdanih i opšte važećih brojčanih podataka za određivanje DGD u slučajevima složene istorije deformisanja, već da se samo izloži jedan nov pristup u tom smislu.

## Literatura

- |1| S. Rasmussen: "Einfluss der Umformgeschichte auf das Grenzformänderungsschaubild"; Blech, Rohre, Profile, 32, 1985; 3; str. 132-136.
- |2| W. Müschenborn, H. Sonne: "Einfluss des Formänderungsweges auf die Grenzformänderungen des Feinbleches"; Arch. Eisenhüttenwes.; 46; 1975; N<sup>o</sup> 9; str. 597-602.
- |3| H. Kleemola, M. Pelkkikagas: "Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel, copper and brass"; Sheet Met. Ind.; 54, 1977, N<sup>o</sup> 6; str. 591-592; 595-596; 599.
- |4| H. Kleemola, J. Kumpulainen, A. Fanta-Eskola: "Factors influencing the forming limits of sheet metals"; Mem. Sci. Rev. Met.; 77, 1980; N<sup>o</sup> 3; str. 403-412.
- |5| A. Fanta-Eskola: "Effect of loading path on the formability of sheet metals"; Mem. Sci. Rev. Met.; 77; 1980; N<sup>o</sup> 4; str. 543-552.
- |6| V. Kolmogorov: "Plastičnost i razrušenje"; Metalurgija; Moskva; 1977; str. 42-49.
- |7| E. Unksov; A. Ovcinikov; "Teorija plastičkih deformacija metalov"; Mašinstroenie; Moskva; 1983; str. 51-57.
- |8| B. Devedžić, M. Stefanović: "Effects of the Friction and Deformation Path on Stretchformability of Sheet Metal"; 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Technol. of Plasticity; Stuttgart; 1987; str. 437-444.

E. Devedžić

A NEW APPROACH TO THE DEFINITION OF THIN SHEET METAL FORMING LIMIT IN THE CASE OF COMPLEX STRAIN HISTORY

## S u m m a r y

Forming limit in complex and nonlinear deformation path is defined on the basis of relationships stemming from the hypothesis of gradual microstructure decohesion during plastic forming, and of the change in the hydrostatic stress in individual phases of this process. The complex deformation path is divided into a number of elements such that within each of them one may, at least approximately, consider the forming to be monotonous and proportional. Using the appropriate limit value of deformation capacity use coefficient, one can obtain the required forming limit curves corresponding to the complex strain paths.

1

V. Vujović\*

POTENCIJAL DEFORMABILNOSTI I NJEGOVO  
KORIŠĆENJE

1. UVOD

Cilj obrade deformisanjem predstavlja prevodjenje oblika pripremkа u oblik obratka. Tom obradom se menjaju oblik i dimenzije pripremkа. Odnosi oblika i dimenzija obratka i pripremkа omogućavaju izračunavanje ukupno potrebne deformacije u toku obrade, koja upravo reprezentuje navedene promene. U vezi ovoga postavlja se nekoliko značajnih pitanja: Koliku promenu oblika može odredjeni materijal da izdrži bez narušavanja njegovog kontinuiteta, da li promenu oblika vršiti u jednoj ili više faza, koliko promena oblika je mogućа u jednoj fazi, a kolika u svim fazama, kakav polazni oblik pripremkа je optimalan, kada je neophodno medjuoperaciono žarenje, koju ulogu imaju promena geometrije alata i obratka u višefaznom oblikovanju. Na sva navedena pitanja moguće je dati odgovore izučavanjem potencijala deformabilnosti materijala. Ovde se posebno insistira na reči "POTENCIJAL", zbog toga što se opravdano može tvrditi i pokazati da je deformabilnost ustvari potencijalno svojstvo materijala, koje se manje ili više ispoljava u funkciji faktora koji determinišu obradni sistem. Dominantnu ulogu u tome ima realizovano naponsko stanje u zoni deformisanja. Deformabilnost materijala je kompleksan pokazatelj, koji uslovljava interdisciplinarni pristup u izučavanju. U ovom radu se ukazuje na kompleksnost problematike deformabilnosti i daju odredjeni rezultati istraživanja usmerenih na odredjivanje krive granične deformabilnosti i načini korišćenja granične deformabilnosti u projektovanju tehnoloških procesa obrade deformisanjem. Istraživanja u ovom području razvijaju se već godinama u Laboratoriji za tehnologiju plastičnosti Univerziteta u Novom Sadu.

---

\*Dr. Vlado Vujović, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, V. Vlahovića 3.

## 2. DEFORMABILNOST MATERIJALA I NJENO ISPOLJAVANJE

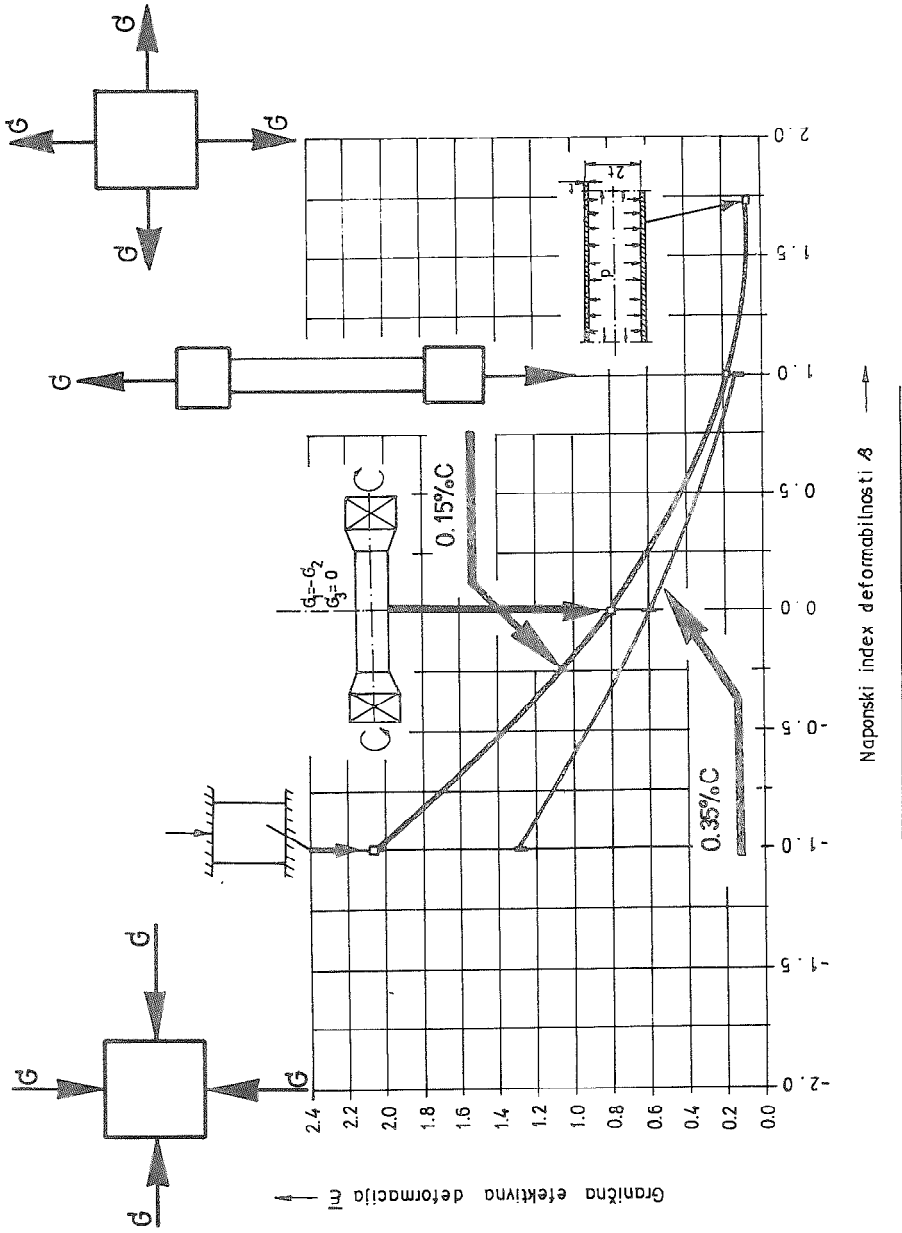
Proučavanje deformabilnosti uslovljava kompleksan interdisciplinarni pristup, pošto ona integriše više problematskih područja:

- hemijski sastav i strukturno stanje materijala
- deformaciono ojačavanje
- teoriju loma
- teoriju dislokacija i defekata u materijalu
- naponsko stanje u zoni deformisanja
- obradni sistem i njegove karakteristike
- tehnologije obrade deformisanjem.

Kompleksna zavisnost deformabilnosti od uticajnih faktora često se izražava preko funkcije deformabilnosti u implicitnom obliku /1,2/

$$F_D = F_D(H_M, S_M, \phi, \dot{\phi}, T_O) \quad (1)$$

U izrazu (1) uključeni su:  $H_M$  - hemijski sastav materijala,  $S_M$  - strukturno stanje materijala,  $\phi$  - veličina deformacije,  $\dot{\phi}$  - brzina deformacije,  $T$  - temperatura obrade i  $T_O$  - naponsko stanje izraženo preko tenzora napona. Ovi faktori se mogu svrstati u dve grupe:  $H_M$  i  $S_M$  kao faktori materijala i ostali faktori u izrazu (1) kao faktori uslova obrade. Zbog ovoga proučavanje deformabilnosti je moguće najmanje sa dva različite aspekta: sa metalurškog aspekta i sa mehaničkog aspekta. U mnoštvu objavljenih radova iz područja deformabilnosti dominiraju dva pristupa u odnosu na načine određivanja deformabilnosti materijala i u vezi s tim korišćenja podataka o deformabilnosti u projektovanju tehnoloških procesa i kreiranju obradnih sistema. Prvi pristup /3, 4, 5, 6/ je zasnovan na vezi maksimalnih i minimalnih deformacija i njega su postavili američki istraživači Keeler i Godwin. Ovaj pristup se veoma uspešno koristiti u području obrade lima. Osnovu drugog pristupa postavili su sovjetski istraživači /7, 8, 9/ i on se zasniva na prezentiranju deformabilnosti pomoću veze efektivne deformacije i naponskog stanja. Ovaj pristup ima značajne prednosti u odnosu na mogućnosti unapredjenja tehnološkog procesa. Osim toga, iako se ovaj pristup pretežno koristi za područje zapreminskog oblikovanja, on predstavlja opšti pristup koji uključuje i područje obrade lima. Pomoću iskazivanja deformabilnosti u funkciji naponskog stanja, eksplicitno se izražava deformabilnost kao potencijalna mogućnost materijala, čije korišćenje zavisi od konstrukcije obradnog sistema. Granična deformabilnost se iskazuje krivom (funkcijom) granične deformabilnosti (KGD) ili (FGD). Na sl.1.prema/2/prikazana je KGD za Č.1221 i Č.1431.Ovaj prikaz se koristi da



SL.1 — Granična deformabilnost

bi se objasnilo ispoljavanje deformabilnosti zavisno od promene naponskog stanja, odnosno, obradnog sistema. Svaka tačka apscisne ose predstavlja posebno naponsko stanje izraženo preko naponskog indeksa deformabilnosti /11/ u obliku

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (2)$$

gde su  $\sigma_1, \sigma_2$  i  $\sigma_3$  glavni naponi, a  $\sigma_e$  - efektivni napon. Posebno je interesantno područje

$$-2 < \beta < 2 \quad (3)$$

pošto se u tom području nalaze naponska stanja koja odgovaraju većini tehnoloških procesa obrade deformisanjem. Granične vrednosti indeksa deformabilnosti odgovaraju dvodimenzionalnom sabijanju (-2), odnosno, dvodimenzionalnom zatezanju (2). U ovom području locirano je mnoštvo procesa zapreminskog oblikovanja kao i procesi obrade lima. Ordinate tačaka KGD predstavljaju potencijalnu vrednost deformabilnosti odredjenog materijala. Očigledno da, za uslove kvazistatičkog hladnog deformisanja, ove vrednosti bitno zavise od naponskog stanja. Lako je pokazati pomoću izraza (2) da za karakteristična naponska stanja aksijalno sabijanje, čisto devijatorsko naponsko stanje i za aksijalno istezanje naponski indeks deformabilnosti dobija vrednosti  $\beta = -1$ ,  $\beta = 0$  i  $\beta = 1$ . To su istovremeno i karakteristične tačke apscisne ose za koje se jednostavnim eksperimentima mogu odrediti vrednosti granične deformabilnosti.

Težak krivih granične deformabilnosti daje odgovor na pitanje kako materijal ispoljava potencijal deformabilnosti u funkciji od naponskog stanja. Ispitivanja izvedena u laboratoriji za tehnologiju plastičnosti univerziteta u Novom Sadu /2/ na materijalima Č.1221, Č.1431, Č.1530 i Č.5421 pokazuju da se ordinate KGD menjaju prema vrednostima datim u tabeli 1. Iz ove tabele je očigledno da menjanje naponske šeme zapreminskog zatezanja prema zapreminskom pritisku omogućava povećanje ispoljavanja deformabilnosti. Drugim rečima promenom sfernog tenzora napona, od pozitivne vrednosti prema negativnoj povećavaju se mogućnosti ispoljavanja deformabilnosti. Odnosi potencijala deformabilnosti (T1) za karakteristične tačke kada je sverni tenzor nula (čisto devijatorsko naponsko stanje) odnosno jednak efektivnom naponu (pozitivan ili negativan) su takvi da ako se aksijalno istezanje uzme kao 100% odnosno 1, onda je za čisto devijatorsko naponsko stanje ( $\beta = 0$ ) potencijal deformabilnosti oko pet puta veći, a za aksijalni pritisak ( $\beta = -1$ ) oko deset puta veći.

T-1

Materijal	Abscisna vrednost	Naponsko stanje	Odnos ordinata	
Č.1221	1	Aksijalno zatezanje	1	(100%)
"	0	Uvijanje	5	(500%)
"	-1	Aksijalno sabijanje	11,12	(1 112%)
Č.1431	1	Aksijalno zatezanje	1	(100%)
"	0	Uvijanje	4,61	(561%)
"	-1	Aksijalno sabijanje	9,69	(969%)
Č.1530	1	Aksijalno zatezanje	1	(100%)
"	0	Uvijanje	4,50	(450%)
"	-1	Aksijalno sabijanje	9,28	(920%)
Č.5421	1	Aksijalno zatezanje	1	(100%)
"	0	Uvijanje	4,83	(483%)
"	-1	Aksijalno sabijanje	12,20	(1220%)

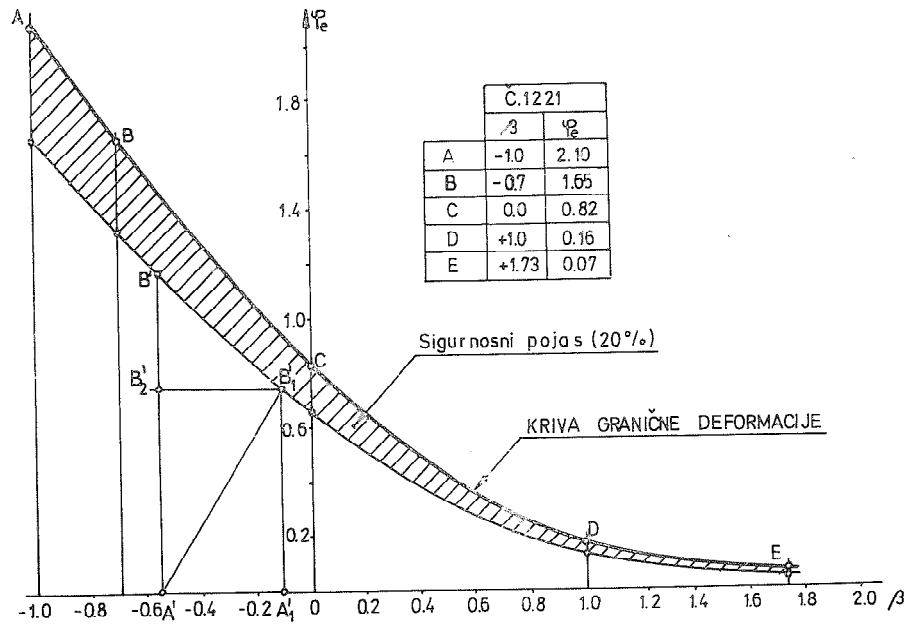
### 3. KORIŠĆENJE POTENCIJALA DEFORMABILNOSTI

Opšte krive granične deformabilnosti trebalo bi priručno posedovati za sve materijale, koji se obradjuju korišćenjem njihovih plastičnih svojstava. KGD kao što je rečeno poseduju informacije o potencijalnim mogućnostima ispoljavanja deformabilnosti. Pitanje je kako KGD koristiti u projektovanju tehnologije obrade i konstruisanju obradnog sistema. Geometrijom priprema u svim fazama obrade i geometrijom alata kao i uslovima trenja na kontaktnim površinama, se bitno utiče na realizovano naponsko stanje. Drugim rečima, uticajem na ove faktore, može se ostvariti veće ili manje korišćenje raspoloživog potencijala deformabilnosti. Treba imati u vidu da limitirajuću vrednost deformabilnosti određuje najnepovoljnije lokalno naponsko stanje. Tamo gde se realizuje najveća vrednost sfernog tenzora stvaraju se uslovi za nastajanje prvih pukotina. Znači da je uslov za korišćenje informacija koje daju KGD posedovanje kompletne slike naponskog stanja zone deformisanja. Poznato je da nije jednostavno doći do podataka o naponskim komponentama u svakoj tački zone deformisanja. Dakle, primena KGD u cilju što boljeg korišćenja potencijala deformabilnosti uslovljava suptilno izučavanje naponsko deformacionih odnosa u procesu promene oblika.

Kolika efektivna deformabilija je moguća u jednoj fazi obrade, odnosno kolika je moguća deformacija bez medjuoperacionog žarenja, dobija se direktno iz krive granične deformabilnosti. Ako se uzme 20% ordinata KGD kao sigurno



nosni pojas, onda se 80% ordinate može koristiti kao efektivna deformacija koja se u procesu deformisanja može dozvoliti. Na sl.2, prikazana je KGD za



Sl.2 - Korišćenje potencijala deformabilnosti

Č.1221 i ucrtan sigurnosni pojas. Ova problematika ima poseban značaj kod višefaznog oblikovanja. U praksi se broj faza obrade određuje na osnovi empirijskih preporuka. Teoretska osnova za racionalno određivanje broja faza oblikovanja predstavlja korišćenje potencijala deformabilnosti na osnovi krive granične deformabilnosti.

Ilustracija korišćenja potencijala deformabilnosti data je grafički na sl.2. U toku procesa se, zbog promene geometrije pripremljena, naponsko stanje menja u smeru manjeg potencijala deformabilnosti, tako umesto da se koristi ordinata  $\overline{AB}$ , ostaje na raspolaganju samo ordinata  $\overline{A_1B_1}$ , koja je utoliko manja u koliko je tačka apscise  $A_1$  koju determiniše realizovano naponsko stanje udaljenija od polazne apscisne tačke A. Obzirom na relativno strmi pad potencijala deformabilnosti sa porastom sfernog tenzora to i manje pomeranje udes-

no apscisnom osom izaziva značajan pad potencijala deformabilnosti. Nova faza oblikovanja u osnovi ima zadatak da prilagodjavanjem geometrije alata formiranom obliku priprema, promeni naponsko stanje u zoni deformisanja, vraćajući time polaznu tačku apscisne ose ulevo - u područje većeg potencijala deformabilnosti.

Na osnovi uticaja naponskog stanja na ponašanje materijala, odnosno, na osnovi promene potencijala deformabilnosti u funkciji naponskog stanja, moguć je razvoj novih tehnologija obrade deformisanjem, koje unapređuju primenu ove tehnologije u oblastima teže deformabilnih materijala i izrade složenijih oblika delova. Primeri za to odnose se na ubrzani razvoj primene tehnologije hladnog istiskivanja zbog velike negativne vrednosti sfernog tenzora napona kao i razvoj hidrostatičke obrade deformisanjem. Na istoj osnovi razvijena je i tehnologija obrade finim razdvajanjem. Medjutim, značajni efekti u racionalizaciji tehnologije obrade deformisanjem mogu se ostvariti preispitivanjem postojećih procesa obrade na osnovi informacija koje daje KGD o potencijalu deformabilnosti i informacija iz procesa obrade o stvarnom korišćenju raspoloživog potencijala. Tim putem se može za svaku fazu obrade utvrditi rezervna deformabilnost.

#### 4. Z A K L J U Č A K

Deformabilnost materijala izražena u funkciji naponskog stanja u zoni deformisanja predstavlja potencijalne mogućnosti materijala, čije korišćenje zavisi od realizacije obradnog sistema, pošto obradni sistem svojom konfiguracijom determiniše naponsko stanje. Opšte krive granične deformabilnosti sadrže informacije, koje se mogu koristiti za projektovanje racionalnijeg procesa izrade delova deformisanjem. Područje indeksa deformabilnosti  $-2 < \Phi < 2$  sadrži veliki broj konvencionalnih metoda obrade deformisanjem. U tom području se KGD mogu eksperimentalno odrediti na relativno jednostavan način. KGD trebalo bi imati priručno za materijale koji se obradjuju plastičnim deformisanjem. Potencijal deformabilnosti izražen kao ordinata KGD može da služi za istraživanje uspešnosti postavljenih procesa obrade deformisanjem, odnosno, za njihovo unapređenje. To se postiže projektovanjem obradnog sistema s obzirom na korišćenje potencijala deformabilnosti materijala.

## 5. L I T E R A T U R A

1. Vujović V.: Odredjivanje krivih granične deformabilnosti pomoću tri različita naponska stanja. Zbornik radova sa XVIII Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Niš, 1984., str.61-72.
2. Vujović V., Plančak M., Vilotić D. i Shabaik A.H.: The use of cold workability test results to predict FLC as a function of stress state. 2nd Conference on tehnology of Plasticity, Stuttgart,1987.
3. Keeler S.P. and Backofen W.A.: Plastic instability and Fracture in sheet stretched over rigid punches, Transactions ASM, vol.56, 1963, pp 25-48.
4. Goodwin G.M.: Aplication of strain analysis to sheet metalforming problems in press shop, SAE Paper, No 680093, 1968.
5. Devedžić B., Stefanović M.: Effects of the Friction and Deformation Path on stretsch Formability of sheet Metal, 2nd Conference on Technology of Plasticity, Stuttgart, 1987., pp.437-444.
6. Devedžić B.: Hipoteze na kojima se zasniva teoretsko-analićka interpretacija dijagrama granične deformabilnsoti limova. Zbornik radova sa 5. Jugoslovenskog simpozija o plastićnosti, str.129-139, Lipik, 1987.
7. Smirnov-Aljajev G.A.: Mehanićeskie osnovi plastićeskoj obrabotki metalov, Mašinstrojenje, Leningrad, 1968.
8. Ogorodnikov V.A.: Ocenka deformirujemosti metalov pri obrabotke davljenijem. Viša škola, Kijev, 1983.
9. Bogatov A.A., Mižirickij O.J. i Smirnov S.V.: Resurs plastićnosti metalov pri obrabotke davljenijem, Metalurgija, Moskva, 1984.
10. Frobin R.: Untersuchung des Umformvermögens und der Umformgrenze. Dissertation, Karl-Marx stadt, 1979.
11. Shabaik A.H., Vujović V.: On the stress Formability index. Conference MDP-4, Kairo, 1988.

V. VUJOVIĆ

## FORMABILITY POTENTIAL AND ITS USE

## S u m m a r y

The formability is a potential material property. Its occurrence is effected by numerous factors. The state of stress in the forming zone has the most important effect. The stress state is determined by the working system. In this way the formability potential occurrence is effected by the design of the working system. The range  $-2 < \beta < 2$  includes numerous of Metalforming processes and the FLC is possible to determin by simple tests. The Methods of the use of formability potential for determination multystage forming are explained.

ПРИЛОГ КОН ПРОУЧУВАЊЕТО НА НАПОНСКАТА  
СОСТОЈБА ПРИ ФИНО ПРОСЕЧУВАЊЕ

В.Стрезов, Ј.Лазарев \*)

1. УВОД

Поради високите специфични притисоци во зоната на просечувањето, работните елементи на алатот се изложени на многу тешки услови на работа. Затоа, и покрај тоа што алатите за фино просечување се значително поскапи од тие за обичното просечување, поради строгите барања во однос на квалитетот на фино просечените делови, алатите бргу се амортизираат и нивниот работен век е неколкукратно понизок од векот на алатите за обично просечување. Тоа, секако доведува и до значително поскапување на производите добиени со фино просечување. Од тука и интересот за сестрано изучување на теоретските основи на ова обработка, а со цел да се постигнат повисоки работни ефекти (почиста просечена површина и попрецизни делови) при повисока општа издржливост на алатот.

Денешните сознанија за карактерот на влијателните фактори врз показателите на овој процес упатуваат на тоа дека тие можат да се групираат во две групи: фактори сврзани за природата на материјалот и надворешни фактори сврзани со механиката на процесот. Во надворешните фактори спаѓаат сите фактори кои влијаат врз напонско-деформационата состојба во

---

\*) Д-р Васил Стрезов, редовен професор на Машинскиот факултет во Скопје

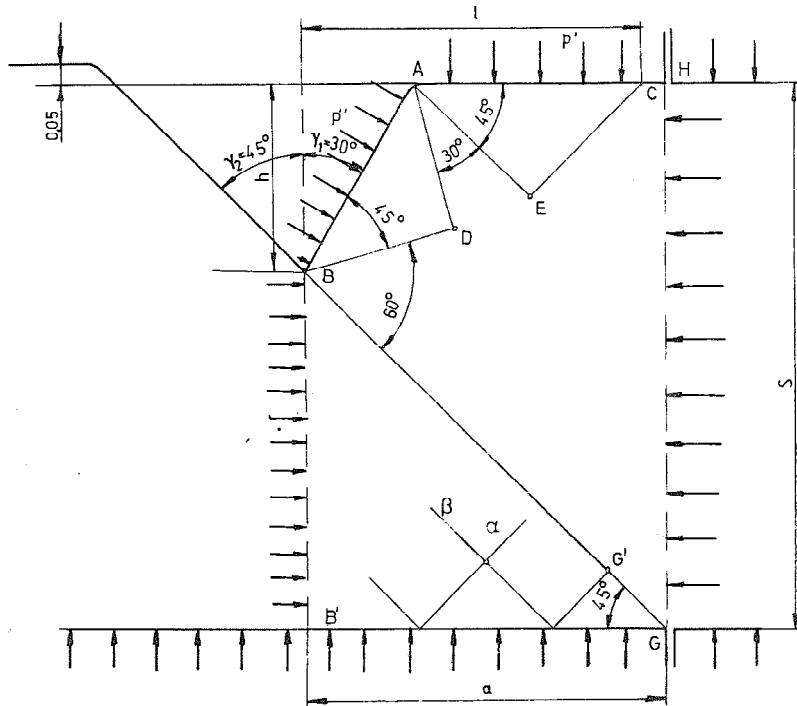
Д-р Јован Лазарев, вонреден професор на Машинскиот факултет во Скопје

критичната зона на просечувањето, а тоа се фактори сврзани со геометријата на алатот. Во оваа група можат да се вбројат и динамичко-кинематичките карактеристики на машината.

## 2. ГЕОМЕТРИСКИ СООДНОСИ ВО ЗОНАТА НА ПРОСЕЧУВАЊЕТО

Од повеќето фактори кои на еден или друг начин имаат определено влијание врз квалитетот на просечената површина и работниот век на алатот, геометријата на клинестото ребро и неговата положба во однос на линијата на просечувањето има особено важно значење. Тоа пред се поради фактот што геометријата на втиснатиот клин има директно влијание врз распоредот на напоните и врз големината на пластичната зона.

Многубројните испитувањата на повеќе истражувачи покажуваат дека од аспект на добивање на високи сестрани притисоци при релативно мали активни сили најповолни резултати даваат притисните плочи со асиметрично изведен клин со агол  $45^\circ + 30^\circ$  (сл.1).



Сл. 1. Напонско-деформациона состојба во секторот на интензивен притисок

Оваа форма на попречен пресек на клинестото ребро овозможува веднаш по допирот со материјалот концентрирање на пластичната зона околу врвот на клинот и ширење на таа зона со неговото продирање во материјалот. Притоа, важно значење имаат висината  $h$  и растојанието од врвот на клинот до линијата на просечувањето ( $a$ ). Висината  $h$  (при веќе усвоени англи) ја дефинира големината на пластичната зона, а растојанието ( $a$ ) ја определува оддалеченоста на линијата на просечувањето и границата на пластичната зона.

Посматран изолирано, како параметар на клинестото ребро може да се усвои односот  $a/h$ . Меѓутоа, поради тоа што е неопходно да се постигнат најповолни напонски услови по целиот пресек на просечувањето се воведуваат два геометриски параметри:  $a/s$  и  $h/s$ , каде што  $s$  – е дебелина на просечуваниот материјал.

Со цел да се дефинираат оптимални напонско-деформациони услови во пресекот на смолкнувањето, неопходно е да се запазат две основни претпоставки:

1) Во пресекот на смолкнувањето треба да се постигне максимален можен хидростатички притисок, со цел да се овозможи одвивање на процесот на раздвојувањето без појава на пукнатини.

2) Пресекот на раздвојувањето, односно смолкнувањето, треба да биде надвор од пластичната зона што ја формира клинестото ребро со своето втиснување. Тоа е потребно од аспект на запазување постојаност на пластичната зона, а со тоа и на напонската состојба и големината на хидростатичкиот притисок.

Да се запазат овие два услова, неопходно е површината на развојувањето да се наоѓа поблиску до пластичната зона, но да не ја допира. Притоа за да се осигура стабилност на условите на раздвојувањето, неопходно е во пресекот на развојувањето да владее еднородна напонска состојба.

Со цел да се дефинира границата на пластичната зона и да се утврди напонската состојба во неа, користен е методот на линиите на лизгање, применет од Хил [1]. Методот се состои во анализа на втиснување на гладок клин во полуограничено тело од крутопластичен материјал при рамнинска состојба на деформациите и без допирно триење ( $\tau_k = 0$ ). При тие претпоставки за условите на допирната површина, таа ќе претставува главна рамнина така што

линиите на лизгањето ќе се состојат од прави наклонети под  $45^\circ$  во однос на таа површина. Така се формира првиот сектор (ABD). Поради познатите особини на линиите на лизгањето формираната пластична зона ја има таа особеност што линијата АВ е еднаква на линијата АС.

Ако моделот на сл. 1 може да се прифати како оптимален во однос на напонската состојба, тогаш геометриските соодноси можат да се добијат од триаголникот ВВ'G, односно:

$$\frac{s-h}{a} = \operatorname{tg} 45^\circ = 1 \quad (1)$$

Меѓутоа, мора да биде сочуван условот

$$a > 2,28 h,$$

од каде се добива првиот услов:

$$\frac{h}{s} < 0,304$$

Од истите соодноси се добива и вториот услов:

$$\frac{a}{s} > 0,695$$

### 3. НАПОНСКА СОСТОЈБА ВО ОБЛАСТА ПОМЕГУ КЛИНЕСТОТО РЕВРО И ПРЕСЕКОТ НА СМОЛКНУВАЊЕТО

Поради постоење на противпритисок, непосредно пред почетокот на просечувањето, се формира секторот ВВ'GHA со изразен сестран (хидростатички) притисок. Ако се претпостави дека со квалитетно подмачкување карактерот на пластичната зона нема да се промени, ќе се добие  $\phi = 30^\circ$ . Притоа, средниот напон на граничната линија АС, при претпоставка дека се постигнува рамномерен притисок  $p'$ , ќе биде:

$$\sigma'_{sr} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = -(p' + k),$$

зашто на површината сега ќе биде  $\sigma_3 = -p'$ , а мора да биде запазен условот на пластичноста  $\sigma'_1 - \sigma'_3 = -2k$ .

Истиот среден напон ќе владее по целиот триаголник, па според тоа и во точката С.

Преобјакни од секторот ACE кон ABD, линиите на лизгае-  
то се свртуваат за агол  $\phi$ . Притоа согласно теоријата на Хенки

$$\sigma''_{sr} - \sigma'_{sr} = -2k\phi$$

оттука

$$\sigma''_{sr} = \sigma'_{sr} - 2k\phi = -p' - k \cdot (1 + \frac{\pi}{3}) \quad (2)$$

Таков среден напон ќе владее по целиот сектор ABD, па според тоа и на граничната површина BD што претставува преод од пластична кон еластична, односно круто пластична област. Поради отсуство на тангенцијални напони на допирната површина AB, нормалниот притисок ќе биде главен напон, па според тоа;

$$p'' = \sigma_1'' = -p' - 2k(1 + \pi/6) \quad (3)$$

За да се постигнат еднородни напони во секторот BB'G, страната BG треба да претставува линија на лизгае. Во таков случај, средниот напон во линијата BG (свртување на линијата BD за  $\pi/3$ ), а според тоа и во линијата G'G ќе биде помал за  $2k\pi/3$  од тој во BD и ќе изнесува

$$\sigma''_{sr} = \sigma''_{sr} - (-2k\pi/3) = -p' - k(1 - \pi/3) = -p' \quad (4)$$

Таков среден напон ќе владее во целиот сектор BB'G, па според тоа и на површината на матрицата B'G.

Врз основа дефинираните напони, односно притисоци на активните површини на притисната плоча, возможно е да се дефинираат и динамичките услови неопходни за создавање на определена напонска состојба. Притоа, за да се формира скицираната зона на сестран притисок (сл. 1), активната површина треба да ја сочинува површината на клинот (A'BA) и рамната површина AC. Според тоа, вкупната сила пренесена врз притисната плоча ќе изнесува:

$$F_{pt} = L [(p_1'' \operatorname{tg} \gamma_1 + p_2'' \operatorname{tg} \gamma_2) h + (l - h \operatorname{tg} \gamma_1) p'] \quad (5)$$

Каде што се: L - вкупна должина на клинестото ребро,

$p_1''$  - притисок од страна на површината под  $\gamma_1 = 30^\circ$

$p_2''$  - притисок од страна на површината под  $\gamma_2 = 45^\circ$

$p'$  - притисок врз рамната површина.



Ако се земе во обзир дека оваа теоретска анализа се врши при претпоставка на круто идеално пластично тело, и при веќе фиксирана пластична зона, при која со порастот на  $\sigma'_3 = -p'$  условот за пластичност не се менува, произлегува дека со порастот на надворешната сила, односно  $p'$ , во целата област АBB'GH ќе дојде до пораст на хидростатичкиот притисок за  $p'$ . Од тука произлегува дека големината на тој притисок ќе има пресудно влијание врз одвивањето на деформациониот процес, зашто директно влијае врз еден од неговите основни параметри. Поради тоа, од интерес за оваа анализа е силата пренесена врз притиснатата плоча да се изрази во функција од притисокот  $p'$ .

По замената на соодветните вредности одделните елементи од изразот (5) се добива:

$$F_{pt} \approx Lh \{ [2k(1 + \pi/6) + p'] \operatorname{tg} 30^\circ + 2k(1 + \pi/4) \operatorname{tg} 45^\circ + (\frac{1}{h} - \operatorname{tg} 30^\circ) p' \}$$

а после средувањето и

$$\frac{F_{pt}}{2kLh} = 2,665 + 2,28 \frac{p'}{2k} = \frac{P_{pt}}{2k} \quad (6)$$

На основа зависноста (6) може да се даде аналитичка и графичка зависност на сите показатели на напонската состојба во областа АBB'GH од релативната притисна сила:

На површината на притиснатата плоча

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_3/2k &= p'/2k = 0,439 p_{pt}/2k - 1,169 \\ \sigma'_1/2k &= 1 + p'/2k = 0,439 p_{pt}/2k - 0,169 \\ \sigma'_{sr}/2k &= 1/2 + p'/2k = 0,439 p_{pt}/2k - 0,669 \end{aligned} \right\} (7)$$

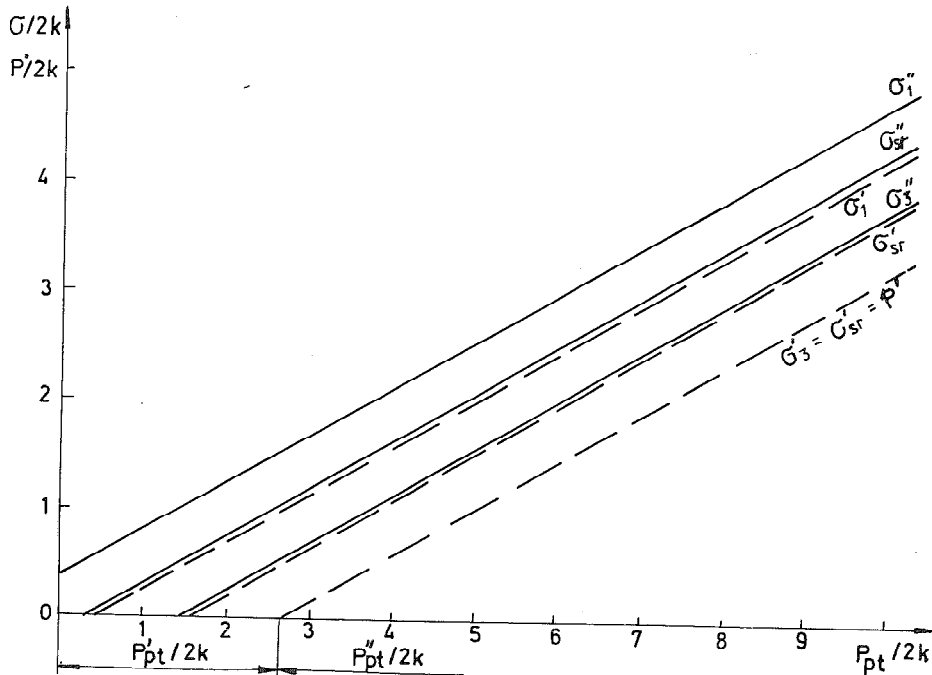
На површината на клинот:

$$\left. \begin{aligned} \sigma''_1/2k &= p''_1/2k = p'/2k + 1 + \pi/6 = 0,439 p_{pt}/2k + 0,355 \\ \sigma''_3/2k &= \sigma''_1/2k - 1 = p'/2k + \pi/6 = 0,439 p_{pt}/2k - 0,645 \\ \sigma''_{sr}/2k &= p'/2k + \frac{1}{2}(1 + \pi/3) = 0,439 p_{pt}/2k - 0,145 \end{aligned} \right\} (8)$$

Во секторот околу површината на развојувањето:

$$\sigma_{sr}/2k = \sigma_1/sk = \sigma_3/2k \approx p'/2k \quad (9)$$

На сл. 2 е даден графички приказ на одделните параметри на напонската состојба. Притоа, за полесно прикажување, како во аналитичките изрази така и во графичките, се дадени нивните апсолутни вредности.

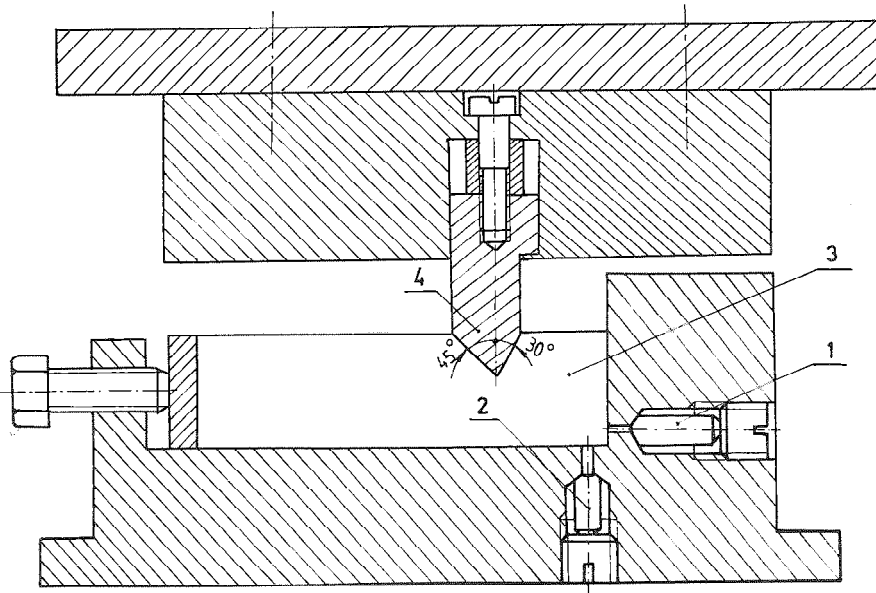


Сл. 2. Графички приказ на параметрите на напонската состојба во областа на интензивни напони

#### 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА

Со експерименталните истражувања следени се: границата на пластичната зона и големината на напоните во една критична точка на површината на смолкнувањето.

За следење на пластичната зона и напоните изработен е експериментален алат (сл.2) во фабриката Црвена застава "Херој Тоза Драговиќ" во Охрид. Тој се состој од основна плоча во која се поставува епруветата 3. Десниот крај на епруветата ја претставува резната површина на просечувањето. Во дното на резната површина поставени се мерни давачи на сила, преку кои се определуваат вертикалните и хоризонталните напони на долниот крај на резната површина.



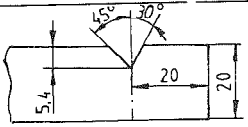
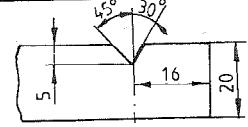
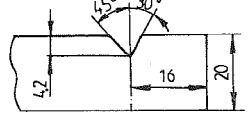
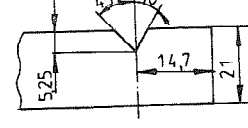
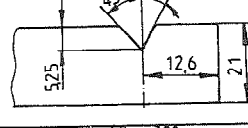
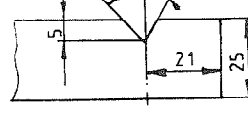
Сл. 2. Експериментален алат  
1,2-мерни давачи на сила; 3-епрувета; 4-клинесто ребро

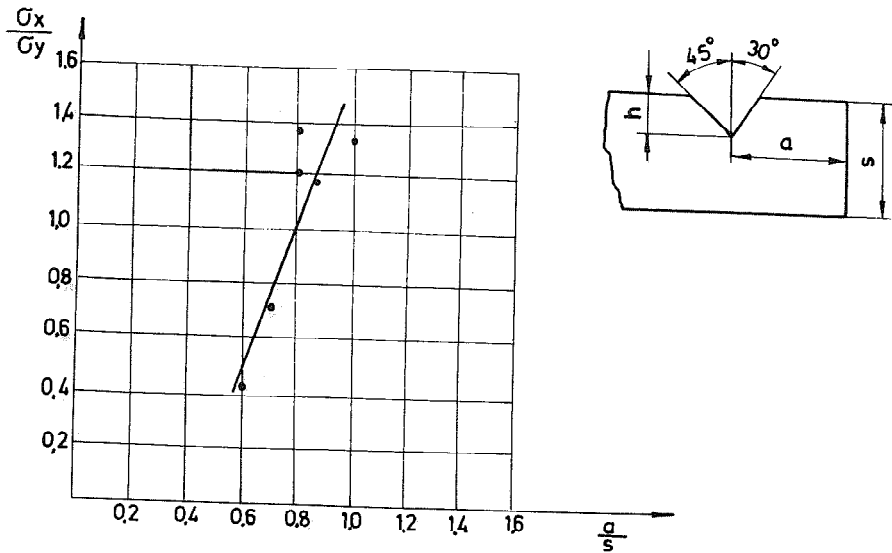
За следење на пластичната зона по методот на координатна мрежа на епруветата со помош на игла беше нацртана мрежа со димензии 2x2 мм. Потоа на микроскопска машина се рчитувани почетните и положбите на јазлите по деформирањето на мрежата.

Добиените резултати за силите и напрегањата во хоризонтален и вертикален правец како и нивниот количник се прикажани во табелата 1.

Од посебен интерес е влијанието на релативното растојание ( $a/s$ ) на реброто од површината на просечувањето врз односот на напрегањата  $\sigma_x / \sigma_y$ . На сликата 3 прикажана е зависноста на односот на напрегањата од релативното растојание на реброто. Најповона напонска состојба е таа кога напоните во хоризонтална и вертикална рамнина се еднакви, односно  $\sigma_x = \sigma_y$ , или  $\sigma_x = \sigma_y = 1$ .

Табела 1. Вредности на силите и напрегањата при испитување со асиметрично клинесто ребро

Шема на испитувањето	$\frac{a}{s}$	$\frac{h}{s}$	$F_x$ KN	$F_y$ KN	$\sigma_x$ KN/cm <sup>2</sup>	$\sigma_y$ KN/cm <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$
1. 	1	0,27	0,55	0,41	17,5	13,0	1,34
2. 	0,8	0,25	0,64	0,52	20,2	16,5	1,22
3. 	0,8	0,21	0,58	0,42	18,5	13,4	1,38
4. 	0,7	0,25	0,099	0,138	3,16	4,40	0,71
5. 	0,6	0,25	0,066	0,155	2,1	4,95	0,42
6. 	0,85	0,26	0,093	0,112	3,5	2,95	1,18



Сл. 3. Зависност на односот на напрегањата од релативното растојание ( $a/s$ )

#### ЗАКЛУЧОК

Со оглед на специфичноста на проучуваниот процес од познатите аналитички методи најлесно може да се адаптира на условите на финото просечување методот на линии на лизгање разработен од Хил (Hill) за втиснување на клин во полуограничен простор [1]. Од овој метод и покрај применетата груба идеализација на условите на допирното триење помеѓу површината на металниот клин и материјалот, покажа значително висока прецизност во однос на определувањето границите на пластичната зона.

Врз основа на анализата, а тргнувајќи од условите дека на површината на раздвојувањето треба да владеат максимални нормални напони на притисок, а самата површина да се наоѓа надвор од пластичната зона (со што се избегнуваат изобличувањата во материјалот), пресметани се геометриските параметри на процесот, односно на работниот алат.

Споредба на пресметаните и емпириски утврдени параметри за асиметрично клинесто ребро ( $45^\circ/30^\circ$ )

П а р а м е т р и	Пресметани вредности	Емпириски утврдени вредности
Геомтриски параметри	$h/s \leq 0,304$	$h/s = 0,2 - 0,3$ $a/s = 0,7$ [3]
	$a/s \geq 0,695$	$h/s = 0,2 - 0,4$ $a/s = 0,7$ [2]
Притисоци	$p'_t \geq 1,14 \sigma_s$	$p'_{pt} = (1,2-1,13) \sigma_s$
	$p''_t \geq 2,665 \sigma_s$	$p''_{pt} = (2,2-2,8) \sigma_s$
	$p_{pt} \geq 3,805 \sigma_s$	$p_{pt} = (3-4) \sigma_s$ [3]

При експерименталните истражувања забележани се два карактеристични феномена:

1. Пластичната зона има сосема различна форма од тоа на идеализираниот модел и се простира сразмерно на поголема површина. Притоа значителни деформации се појавуваат и во пределот под клинестото ребро.

2. Мерените сили и пресметаните нормални напони во критичниот дел од пресекот (точка G) покажуваат дека главните оски на напоните во тоа точка не се совпаѓаат со тие на лимот, туку постојано го менуваат аголот во зависност од геометриските параметри  $h/s$  и  $a/s$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R.Hill: The mathematical thory of plasticity. Oxford, 1971.
2. Feinschneden - Handbuch
3. Вишневскии Н.С.А.Г.Овчинников, Иследование процес чистовой вирубни со сжанием, КШП, 1974 бр. 1
4. В.Стрезов, Ј.Лазарев. Теоретски истражувања за финото просекување и примена на современи методи за изработка на алат. Машински факултет - Скопје, 1979.

V. Strezov, J. Lazarev

#### ZUSAMMENFASSUNG

#### EIN BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES SPANNUNGSZUSTANDS BEIM FEINSCHNEIDEN

Ausgehend von den Erfahrungen, dass auf den Effekten des Feinschneidens den dominanten einfluss den Spannungszustand auf der Oberfläche des gestanzten Materials hat, wurde ein Versuch Gemacht, analytisch und experimental die Plastikzone sowie die Spannungen in dem kritischen Durchschnit zu erforschen. Zu diesem Zweck wurde die bekannte Lösung von R.Hill über den Eindrücken des symetrischen Keil in dem halbbegrenzten Korper benutzt. Mittels Adaptation dieser Lösung in den Bedingungen des Feinschneidens wurde die Plastikzone definiert und damit auch die fundamentale geometrische und dynamische Prozessparametern.

Bei den Versuchforschung wurde die Plastikzone mittel vorher gebrachten Koordinantnetz beobachtet und die Spannungen wurden in einem Punkt der Fläche des Schneidens mittels Messdosis gemessen.

D. Vilotić\*

PRIKAZ METODE EKSPERIMENTALNOG ODREĐJIVANJA  
DEFORMACIONOG STANJA

1. UVOD

Odredjivanje deformacionog stanja u procesima obrade deformisanjem je od velikog značaja jer omogućuje analizu tečenja metala i uslova pojave oštećenja u strukturi materijala, odnosno analizu deformabilnosti materijala. Precizno odredjivanje deformacionog stanja u zoni deformisanja nekog obratka je veoma složeno i zahteva eksperimentalna istraživanja.

U ovom radu prikazana je metoda odredjivanja komponentata male i konačne deformacije koja je bazirana na praćenju pomeranja tačaka deformisanog tela.

2. POSTAVKA METODE

Metoda odredjivanja komponentata deformacija sastoji se iz nekoliko faza koje su u nastavku ukratko prezentirane. Prikaz metode odnosi se na slučaj ravanskog deformacionog stanja ( $\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ ).

2.1 Nanošenje koordinatne mreže

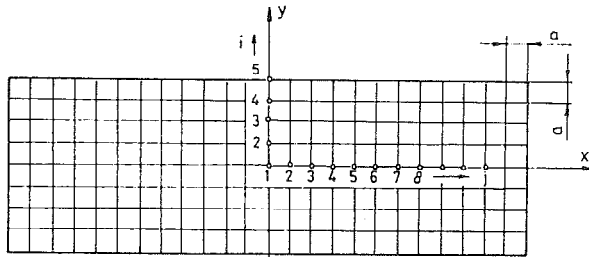
Na čeonu površinu uzorka nanosi se koordinatna mreža određenih dimenzija (sl.1) nekim od poznatih postupaka: elektrohemij-skim, fotopostupkom, mehaničkim putem itd. U ovom radu primenjen je postupak mehaničkog nanošenja koordinatne mreže. Merenjem koordinata čvornih tačaka dobijeni su polazni podaci u obliku:

$$X_0 = [x_{0ij}] \quad Y_0 = [y_{0ij}] \quad (1)$$

---

\* Dr Dragiša Vilotić, dipl.ing., docent Fakulteta tehničkih nauka, 21000 Novi Sad, V.Vlahovića 3.





Sl.1 Polazna koordinatna mreža

## 2.2 Deformisanje uzorka i merenje koordinata mreže

Uzorak se deformiše sa nominalnom vrednošću stepena deformacije od 10%, a zatim se ponovo mere koordinate svih posmatranih tačaka mreže. Na taj način dobijaju se matrice podataka za 1. fazu procesa:

$$Y_1 = [x_{1ij}] ; \quad Y_1 = [y_{1ij}] .$$

Uzorak se zatim ponovo deformiše za 10% (2. faza), i ponovo mere koordinate čvorova mreže. Postupak deformisanja uzorka i merenja geometrijskih veličina izvodi se sukcesivno sve do željene vrednosti stepena deformacije (ili do razaranja obratka). Na taj način dobijaju se matrice koordinata čvorova deformisane mreže:

$$X_\ell = [x_{\ell ij}] ; \quad Y_\ell = [y_{\ell ij}] \quad (2)$$

gde je:

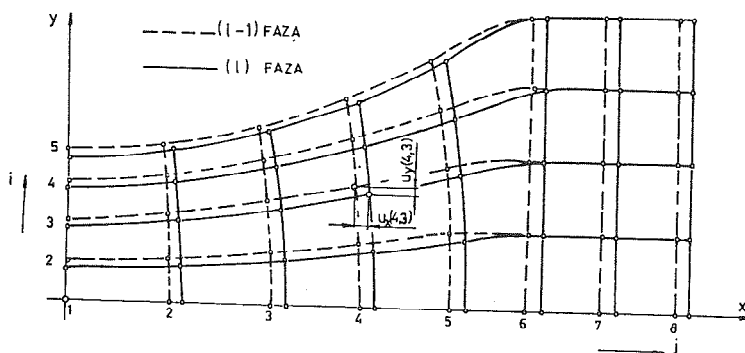
$$\ell = 0, 1, 2, \dots, n - \text{redni broj faze deformisanja.}$$

## 2.3 Odredjivanje pomeranja u pravcu koordinatnih osa

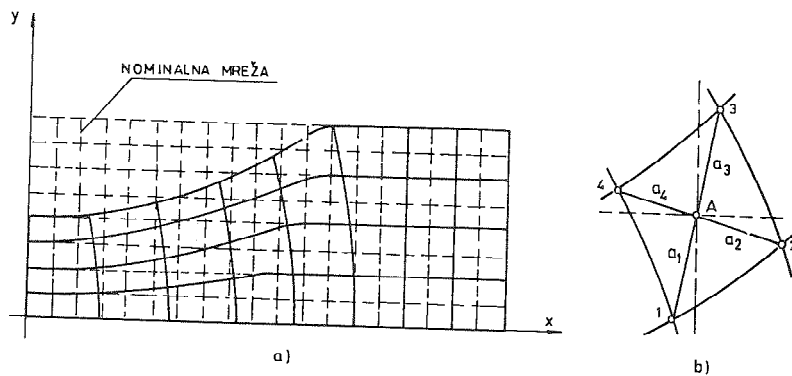
Pomeranje čvorova mreže u pravcu osa nepokretnog koordinatnog sistema (x,y) za fazu sa rednim brojem  $\ell$  (sl.2) odredjuju se prema izrazima:

$$U_{x\ell} = [x_{\ell ij}] - [x_{(\ell-1)ij}] ; \quad U_{y\ell} = [y_{\ell ij}] - [y_{(\ell-1)ij}] \quad (3)$$

Na osnovu dobijenih podataka interpolacijom se odredjuju pomeranja u čvorovima nominalne koordinatne mreže (sl.3).



Sl.2 Pomeranje čvorova mreže



Sl.3 Nominalna koordinatna mreža

#### 2.4 Određjivanje funkcija pomeranja

Na osnovu komponenti pomeranja u čvorovima nominalne koordinatne mreže regresionom analizom određuju se funkcije pomeranja u obliku:

$$\begin{aligned}
 u_{xn}(x) &= F_1(x) \quad \text{za } y = \text{const.} \\
 u_{xn}(y) &= F_2(y) \quad \text{za } x = \text{const.} \\
 u_{yn}(y) &= F_3(y) \quad \text{za } x = \text{const.} \\
 u_{yn}(x) &= F_4(x) \quad \text{za } y = \text{const.}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

### 2.5 Komponente male deformacije

Komponente male deformacije određuju se primenom poznatih izraza:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u_{xn}}{\partial x} = \frac{dF_1(x)}{dx} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial u_{yn}}{\partial y} = \frac{dF_3(y)}{dy}\end{aligned}\quad (5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_{xn}}{\partial y} + \frac{u_{yn}}{\partial x} = \frac{dF_2(y)}{dy} + \frac{dF_4(x)}{dx}$$

Deformacija u pravcu z-ose:

$$\epsilon_z = -(\epsilon_x + \epsilon_y) \approx 0 \quad (6)$$

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{xy}^2} \quad (7)$$

### 2.6 Komponente konačne deformacije

Konačnu deformaciju za posmatranu fazu procesa predstavlja zbir malih - etapnih deformacija iz prethodnih faza:

$$\begin{aligned}e_x &= \Sigma \epsilon_{xi} & e_{xy} &= \Sigma \gamma_{xyi} \\ e_y &= \Sigma \epsilon_{yi} & e_e &= \Sigma \epsilon_{ei} = \phi_e\end{aligned}\quad (8)$$

Sabiranje malih deformacija moguće je samo ako se one odnose na istu fizičku tačku deformisanog tela. Zbog toga je neophodno komponente male deformacije pre sumiranja prebaciti u fizičku mrežu (presečene tačke krivolinijske mreže), što se postiže ponovnom interpolacijom.

## 3. PRIMENA METODE I REZULTATI

Na čeonu površinu prizmatičnog uzorka izradjenog od Č1431 (dimenzija 18x48 mm) naneta je kvadratna mreža dimenzija 1,5 x 1,5 mm mehaničkim obeležavanjem. Debljina linija mreže iznosila je 0,1 mm, a dubuna 0,05 mm.

Posle merenja početnih koordinata mreže pristupilo se inkrementalnom deformisanju uzorka. Uzorak je deformisan s nominal-

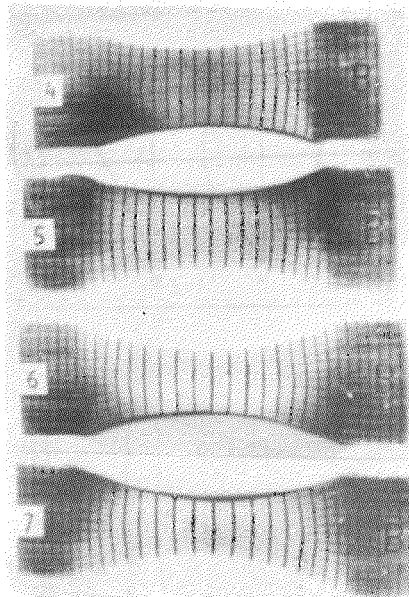
nom vrednošću deformacije 10%, a zatim su vršena merenja koordinata čvorova mreže. Ukupno je izvedeno sedam faza deformisanja nakon kojih su se pojavile pukotine na suprotnoj čeonj površini uzorka. Deformisanje uzorka vršeno je na hidrauličnoj presi od 6,3 MN firme Sack-Kiesselbach pomoću specijalnog alata.

Izgled deformisanog uzorka po fazama dat je na sl.4.

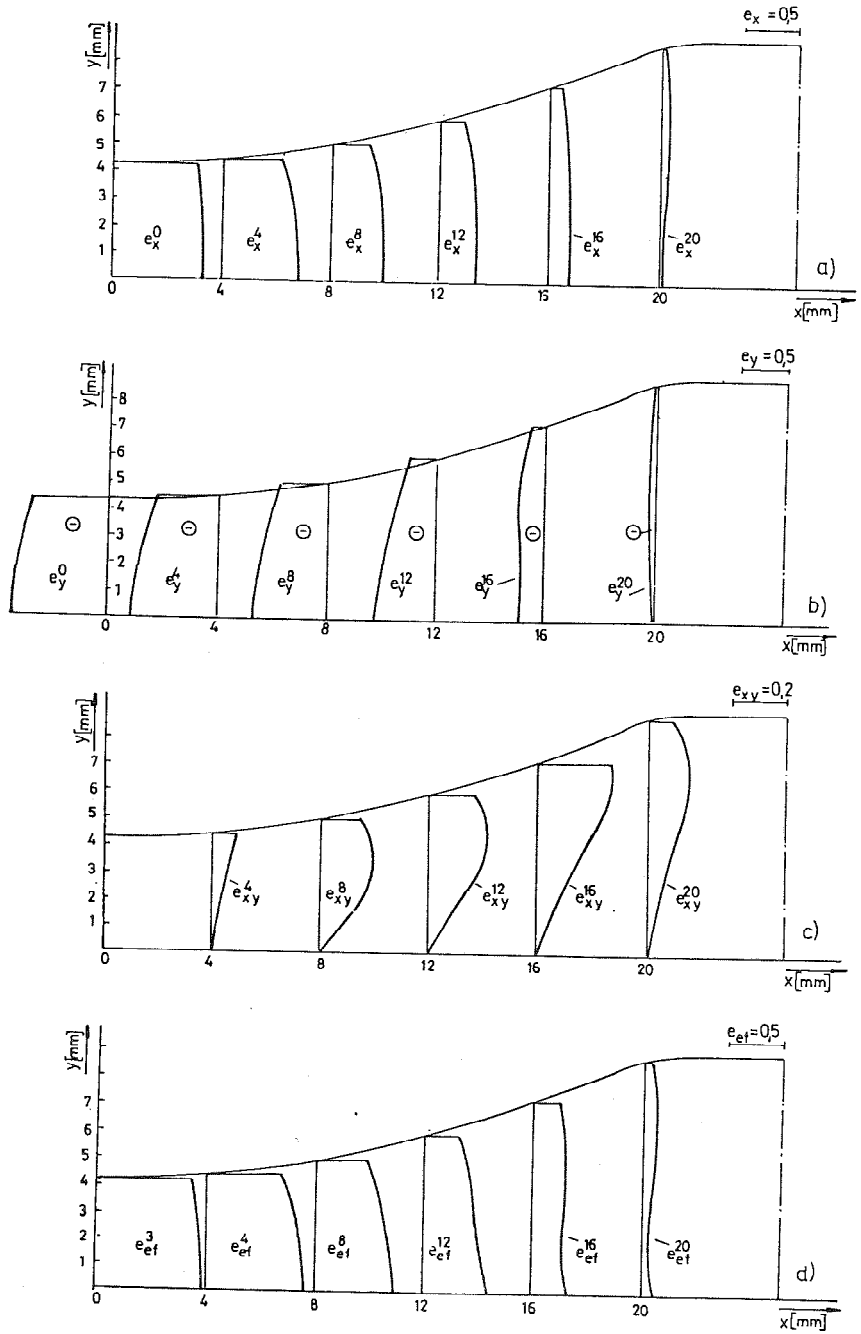
Numerička analiza rezultata prema postupku koji je iznet u prethodnoj tački izvršena je na računaru ISKRA-DELTA 4850 za koji je napravljen odgovarajući program. Proračun je izveden za svih sedam faza procesa deformisanja, a njime je obuhvaćeno izračunavanje sledećih veličina:

1. Komponente pomeranja tačaka u pravcu koordinatnih osa -  $u_x$  i  $u_y$ .
2. Komponente malih (etapnih) deformacija -  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  i  $\epsilon_e$ .
3. Komponente konačnih deformacija -  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_{xy}$  i  $e_{ef}$ .

Deo rezultata analize deformacionog stanja prikazan je na dijagramima (sl.5).



Sl.4 Izgled uzorka po fazama



Sl.5 Raspored konačnih deformacija u 7. fazi deformisanja

#### 4. ZAKLJUČAK

Prikazana eksperimentalna metoda omogućuje detaljno određivanje komponenti deformacionog stanja u posmatranim tačkama deformisanog tela. Iako je za određivanje deformacionog stanja prema prikazanoj metodologiji potrebno izvesti opsežna eksperimentisanja, može se zaključiti da je ovaj postupak značajno jednostavniji u odnosu na druge, bazirane na koordinatnoj mreži [1,2,3,4]. Za realizaciju navedene metode dovoljno je meriti samo koordinate čvornih tačaka mreže na osnovu kojih se određuju funkcije pomeranja u pravcu koordinatnih osa a zatim komponente male i komponente konačne deformacije.

#### Reference

- [1] Smirnov-Aljajev, G.A.: Soprotivljenje materialov plastičeskomu deformirovaniju. Mašinstroenie, Leningrad, 1978.
- [2] Bredendick, F.: Methoden der Derormationsermittlung an verzerren Gitten. Wiss. Z.T.U. Dresden, N.2, 1969.
- [3] Theocaris, P.: Moire Fringes in Strain Analysis. Pergamon Press, Oxford, 1969.
- [4] Vilotić, D.: Ponašanje čeličnih materijala u različitim obradnim sistemima hladnog zapreminskog deformisanja, FTN, Novi Sad, 1987.

D.Vilotić

#### PRESENTATION OF THE EXPERIMENTAL METHOD FOR THE STRAIN STATE ESTIMATION

#### S u m m a r y

In the work the method for the estimation of the components of small and finite strain (deformation) is presented. The method is based upon the following of the marked point in the deformed body.

Particular application of this method is plane-strain deformation.

By means of presented method the strain state on the free surface in upsetting of prismatical sepcimen with cylindrical dies is determined.



M. Jurković\*

ODREĐIVANJE GRANIČNE DEFORMABILNOSTI  
METALA U FUNKCIJI NAPONSKIH STANJA

1. U V O D

Obada metala deformisanjem može se značajno unaprijediti primjenom novih tehnologija (deformisanje u zoni ultrazvuka, deformisanje u uslovima elektroplastičnosti, deformisanje u zoni hidrodinamičkog trenja, visokobrzinske obrade metala deformisanjem-eksplozivno deformisanje, impulsne obrade itd.) [1] i racionalizacijom i optimizacijom postojećih. Dugi niz godina traženi su putevi unapređenja deformacionih procesa primjenom materijala odgovarajućeg hemijskog sastava, postizanjem pogodnih mehaničkih osobina, izborom optimalne plastične strukture i efikasnog podmazivanja itd., što je nesumnjivo doprinjelo podizanju tehnološkog nivoa ove široko primjenjene obrade metala.

Međutim, posljednjih godina, kao i danas sve su veći zahtjevi da se proces obrade deformisanjem izvodi sa što manje utrošene energije, odnosno da stepen efikasnosti procesa bude što veći. Da bi navedeni zahtjev bio ostvariv u realnim uslovima obrade metala deformisanjem treba s jedne strane problem rješavati u oblasti konstrukcije obradnih sistema (geometrijski oblik alata, kontaktne površine, sistem podmazivanja, prenos energije itd.) i s druge strane u oblasti tehnologije plastičnosti podizanjem nivoa deformabilnosti materijala. Naime, istraživanja [2], [3] su pokazala da se u funkciji naponskog stanja može značajno uticati na granični stepen deformacije.

2. MODELI ISTRAŽIVANJA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI

Pri istraživanju granične deformabilnosti metala u funkciji naponskog stanja korišteni su različiti tehnološki modeli pri izradi uske trake [4], [5], i to:

\* Dr Milan Jurković, dipl.ing., redovni profesor Mašinskog fakulteta u Banjaluci, ul. Danka Mitrova 63A



- tehnologija matričnog izvlačenja (sl.1a),
- tehnologija valjačkog izvlačenja (sl.1b) i
- tehnologija valjanja (sl.1c).

Skica modela deformisanja	Šema glavnih napona	Šema glavnih deformacija
	$\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$	$ \epsilon_1  >  \epsilon_3  >  \epsilon_2 $
	$\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$	$\epsilon_1 = -(\epsilon_2 + \epsilon_3)$
	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	

Sl.1 Tehnološke metode izrade uske trake

Primjenom prikazanih tehnoloških metoda metal se istiskuje u pravcu uzdužne ose i poprečno na tu osu, s obzirom da se deformisanje izvodi u uslovima slobodnog širenja. Navedeni postupci imaju široku primjenu u oblasti izrade uskih traka i punih profila.

### 3. DEFINICIJA PLASTIČNOSTI I DEFORMABILNOSTI

U opštem slučaju plastičnost materijala je sposobnost da pod dejstvom vanjskih sila trajno mijenja oblik bez pojave pukotine. Ovo svojstvo odnosi se na standardne uslove ispitivanja osobina materijala, dok se deformabilnost odnosi na realne procese obrade deformisanjem.

Deformabilnost zavisi od više uticajnih faktora [2], [6], što se može prikazati pomoću jednakosti

$$D = f( H, S, T, \varphi, \dot{\varphi}, T_{\sigma} \dots ) \quad (1)$$

gdje su:

H, S - hemijski sastav i struktura materijala, T - temperatura obrade,  $\varphi, \dot{\varphi}$  - stepen i brzina deformacije,  $T_{\sigma}$  - tenzor napona, odnosno naponsko stanje.

Ako se usvoji jedna te ista vrsta materijala, te da se proces deformisanja izvodi u hladnom stanju sa istom brzinom i stepenom deformacije dobije se

$$D = f( T_{\sigma} \dots ) \quad (2)$$

Najveća deformabilnost se izražava graničnim stepenom deformacije ili preko efektivne deformacije

$$\varphi_{eg} = f( T_{\sigma} ) \quad (3)$$

Prema tome, deformabilnost zavisi od naponskog stanja, što znači da se izborom optimalne šeme komponentata glavnih napona može postići visok intenzitet granične deformabilnosti. Za date modele deformisanja (sl.1) najveću deformabilnost daje ono naponsko stanje gdje se ostvari najveći stepen deformacije do pojave prve pukotine [7], što znači kada funkcija cilja  $F_{\sigma} = T_{\sigma} \rightarrow T_{\sigma_{opt}}$ , tada deformacija  $\varphi_{\sigma} \rightarrow \varphi_{eg}$ .

Umjesto tenzora napona sa šest nepoznatih komponenti kao karakteristika naponskog stanja koristi se pokazatelj naponskog stanja

$$\beta = \frac{3\sigma}{\sigma_e} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (4)$$

ili

$$\beta = \frac{I_1}{\sqrt{3I_2}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (5)$$

gdje su:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - komponente normalnih odnosno glavnih napona,

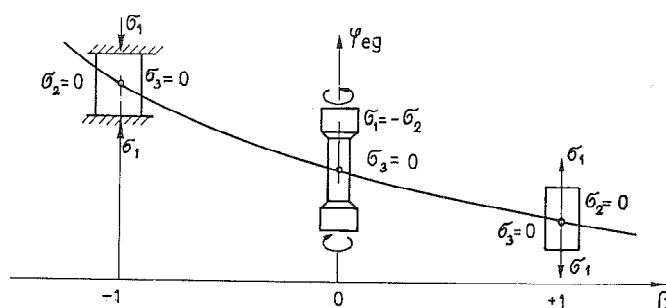
$\sigma_e$  - efektivni napon ( u uslovima plastičnog tečenja  $\sigma_e = k$  ),

k - specifični deformacioni otpor,

$I_1, I_2$  - invarijanta tenzora, odnosno devijatora napona.

#### 4. PODRUČJE DEFINISANOSTI DEFORMABILNOSTI ELEMENTARNIH MODELA DEFORMISANJA

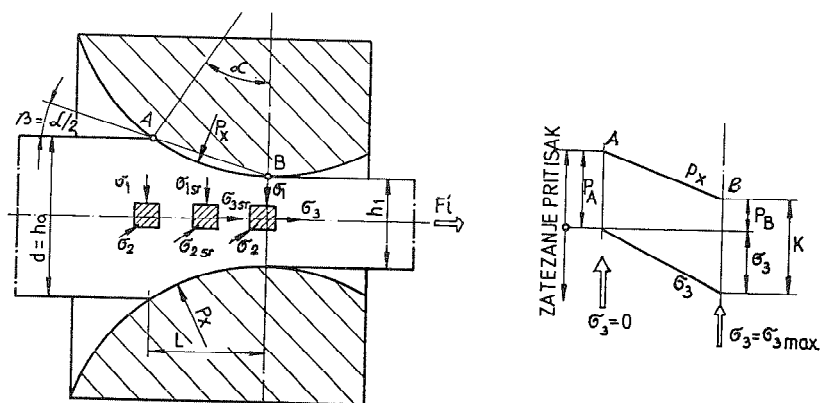
Dijagram deformabilnosti elementarnih modela deformisanja [2], [6], prikazan je na sl.2. Prikazane tri tačke na dijagramu deformabilnosti nisu dovoljne za tačnije definisanje obradivosti. Definisanje ostalih tačaka u dijagramu zahtjeva identifikaciju naponskog stanja u zoni gdje dolazi do pojave pukotine.



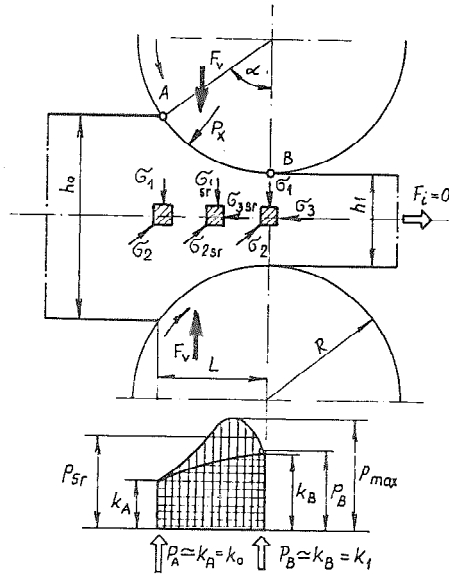
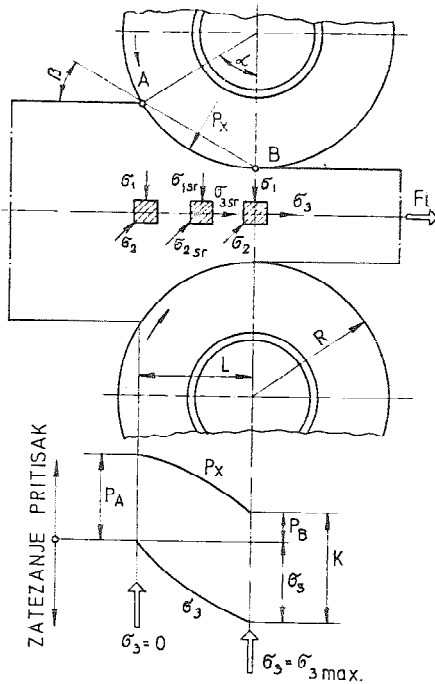
Sl.2 Dijagram deformabilnosti

Granična deformabilnost  $\varphi_{e\beta}$  se povećava sa povećanjem intenziteta negativnih komponenta napona, a smanjuje sa povećanjem pozitivnih komponenti napona.

#### 5. ŠEMATSKI PRIKAZI RAZMATRANIH MODELA DEFORMISANJA



Sl.3 Model matičnog izvlačenja



Sl.4 Model valjačkog izvlačenja      Sl.5 Model valjanja

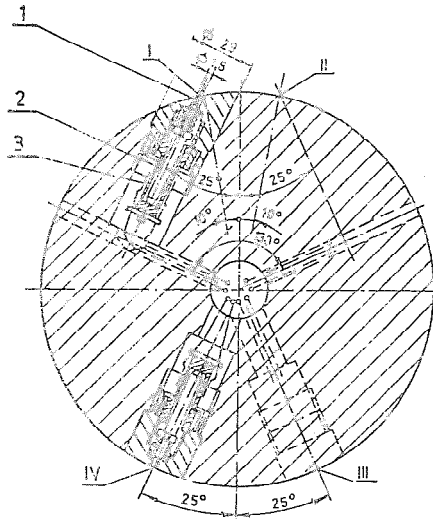
## 6. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Osnovni cilj eksperimentalnog istraživanja je definisanje stepena deformacije pri pojavi pukotine na uskoj čeličnoj traci i određivanje radijalnog pritiska, te napona izvlačenja kao parametara za proračun pokazatelja napona.

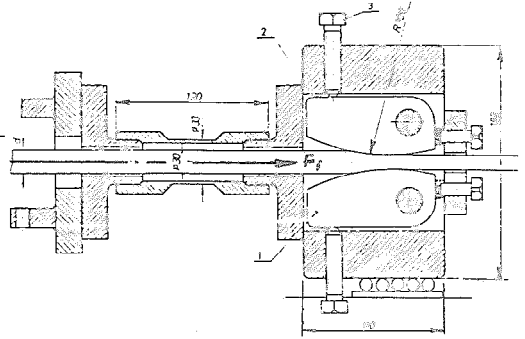
### 6.1. Mjerna aparatura

Eksperimentalno istraživanje je obavljeno na posebno pripremljenoj mašini za valjanje i izvlačenje uz korištenje vlastito izgrađene mjerne aparature [4], [5], sa ugrađenim tenzometrijskim pretvaračima za mjerenje radijalnog pritiska (sl.6) i kontaktnog tangencijalnog napona, koji se mjeri pomoću koso ugrađene tenzometrijske igle u radni valjak.

Napon izvlačenja određen je pomoću izmjerene sile izvlačenja (sl.7) i poprečnog izlaznog presjeka uske trake.



Sl. 6 Mjerac̄ radijalnog i tangencijalnog napona



Sl.7 Mjerac̄ sile izvlaćenja

## 6.2. Rezultati eksperimenta

Tabl.1 Granični stepen deformacije

Broj pro- be	$d, h_i$	$b_i$	$\epsilon_j$	$\epsilon_u$	$\varphi_u$	$k_i = \sigma_{0,2}$	$k_{sr}$	$p_{sr}$	$\sigma_i$
	mm	mm	%	%	%	daN/mm <sup>2</sup>			
M A T R I Č N O I Z V L A Č E N J E									
0	6,97	—	—	—	—	37,1	—	—	—
1	6,00	7,25	14,3	14,3	0,150	44,4	40,75	34,2	28,9
2	5,10	7,60	15,0	27,1	0,312	50,7	47,55	39,8	31,8
3	4,00	8,15	17,6	42,3	0,555	56,9	53,80	40,6	34,2
4	3,00	8,56	25,0	57,1	0,843	62,6	50,75	42,4	39,4
V A L J A Č K O I Z V L A Č E N J E									
0	6,97	—	—	—	—	39,6	—	—	—
1	4,85	8,00	30,7	30,7	0,363	49,9	44,25	38,5	27,1
2	2,98	9,02	38,5	57,4	0,850	61,6	55,75	44,0	33,5
3	1,90	9,60	36,3	72,7	1,290	72,2	63,9	52,7	39,8
4	1,15	9,79	36,1	83,5	1,802	78,8	75,5	58,4	42,2
V A L J A N J E									
0	6,97	—	—	—	—	37,2	—	—	—
1	3,10	9,10	55,7	55,7	0,810	54,5	45,85	60,7	—
2	2,23	10,25	27,4	67,4	1,140	60,8	57,65	72,5	—
3	1,20	11,15	46,6	82,4	1,760	68,9	64,85	81,8	—
4	0,65	11,70	45,8	90,7	2,372	74,4	71,65	88,1	—

## 7. DEFINISANJE KRIVE GRANIČNE DEFORMABILNOSTI

Pri određivanju pokazatelja naponskog stanja na vanjskoj konturi bočne strane trake (sl. 3), gdje se javlja pukotina, komponenta  $\sigma_x = \sigma_z = 0$ , što znači da se radi o ravanskom naponskom stanju, tako da je za metrično i valjačko izvlačenje

$$\beta = \frac{-\sigma_x + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{-p_x + \sigma_z}{k} \quad (6)$$

odnosno uslov plastičnog tečenja

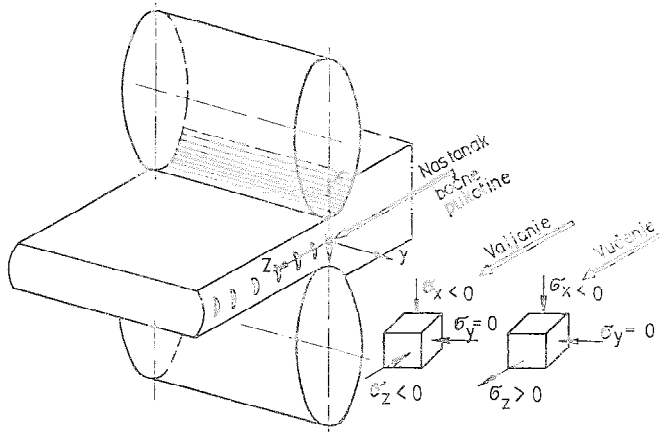
$$k = \sigma_3 + \sigma_1 = \sigma_z + p_x \quad (7)$$

Za postupak valjanja

$$\beta = \frac{-\sigma_x - \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{-p_x - \sigma_z}{k} \quad (8)$$

odnosno uslov elastičnog tečenja

$$k = \sigma_1 - \sigma_3 = p_x - \sigma_z \quad (9)$$



Sl. 3 Nastanak prve pukotine

Korištenjem tabelarnih podataka (tabl.1) i jednakosti (6) i (7) određeni su parametri ( $\beta$ ,  $\varphi_e = \varphi_u$ ) za definisanje krive granične deformabilnosti prikazani u tabl.2.

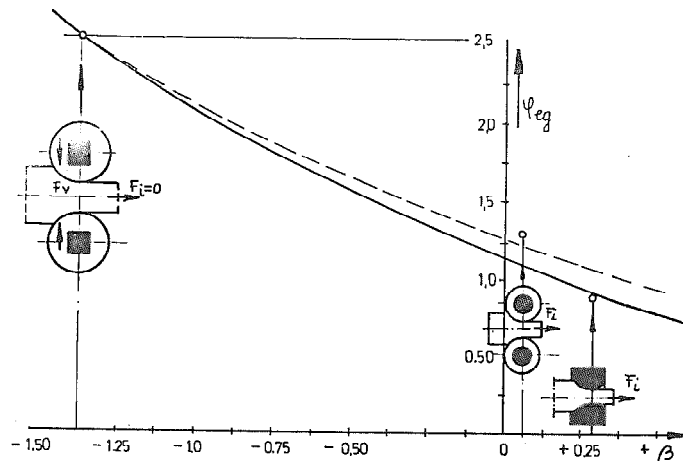
Tabl.2 Pokazatelj naponskog stanja na mjestu pukotine

Broj pro-laza	Z O N A D E F O R M A C I J E							
	U L A Z				I Z L A Z*			
	$k_0$	$p_x = G_1$	$G_3$	$\beta$	$k_1$	$p_x = G_1$	$G_3$	$\beta$
	daN/mm <sup>2</sup>			-	daN/mm <sup>2</sup>			-
1	37,1	37,1	0	-1	44,4	15,5	28,9	+ 0,30
2	44,4	44,4	0	-1	50,7	18,9	31,8	+ 0,26
3	50,7	50,7	0	-1	56,9	22,7	34,2	+ 0,20
4	56,9	56,9	0	-1	62,6	23,2	39,4	+ 0,26
1	38,8	38,8	0	-1	49,9	22,8	27,1	+ 0,08
2	49,9	49,9	0	-1	61,6	28,1	33,5	+ 0,08
3	61,6	61,6	0	-1	72,2	32,4	39,8	+ 0,10
4	72,2	72,2	0	-1	78,8	36,6	42,2	+ 0,07
1	37,2	37,2	0	-1	54,5	60,7**	6,2	- 1,23
2	54,5	54,5	0	-1	60,8	72,5	11,7	- 1,39
3	60,8	60,8	0	-1	68,9	81,8	12,9	- 1,38
4	68,9	68,9	0	-1	74,4	88,1	13,7	- 1,37

\* Na izlazu iz zone deformacije javlja se pukotina na konturi bočne strane trake

\*\* Mjerenjem je određen srednji radijalni pritisak  $p_{sr}$  kod postupka valjanja, što uslovljava manju grešku pri proračunu pokazatelja napona.

Kriva granične deformabilnosti dobivena na osnovu tri razmatrana tehnološka modela prikazana je na sl. 9.



Sl.9 Kriva granične deformabilnosti

## 8. ZAKLJUČAK

Izvedenim istraživanjem dokazan je znatan uticaj naponskog stanja na sposobnost obrade metala deformisanjem, što pokazuje da se optimizacija procesa obrade deformisanjem kao i izbor optimalne metode obrade može izvesti izborom optimalne šeme komponenata glavnih napona [4]. Dakle, granični stepen deformacije nije konstantna veličina, već zavisi u najvećoj mjeri od ostvarenog naponskog stanja materijala u zoni deformacije. Kod istoimenog pritisknog naponskog stanja (model valjanja) ostvaren je granični stepen deformacije  $\varphi_e = \varphi_u = 2,372$ , kod raznoimenog naponskog stanja (model valjačkog izvlačenja)  $\varphi_e = \varphi_u = 1,354$ , dok je kod matričnog izvlačenja  $\varphi_e = \varphi_u = 0,843$ .

Sve navedeno upućuje na generalni zaključak da se veća efikasnost i produktivnost deformacionih procesa, nesumnjivo znatno više, mora tražiti i kroz optimizaciju naponskog stanja u zoni deformacije.

## Reference

- [1] Jurković M., Popović P., Primjenjene tehnologije i fleksibilni obradni sistemi za izradu profila, Zbornik radova FOSIP'88, Mašinski fakultet, Banjaluka, Bihac, 1988.
- [2] Vujović V., Određivanje krive granične deformabilnosti pomoću tri različita naponska stanja, Časopis Obrada deformisanjem u mašinstvu, br.1, Novi Sad, 1984.
- [3] Jurković M., Naponsko stanje u zoni deformacije osnovna determinanta deformabilnosti materijala i efektivnosti deformacionog procesa, Zbornik radova IV Inter. simpozijuma, Herceg Novi, 84.
- [4] Jurković M., i dr. Izbor optimalne metode kod proizvodnje uske čelične trake, SIZ nauke BiH, Sarajevo, 1981.
- [5] Jurković M., Geometrija presjeka trake u funkciji termomehaničkih faktora i naponskog stanja procesa hladnog deformisanja, Mašinski fakultet Banjaluka, 1981.
- [6] Vilotić D., Ponašanje čeličnih materijala u različitim obradnim sistemima hladnog zapreminskog deformisanja, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1986.
- [7] Jurković M., Maksimalno dozvoljeni i optimalni stepen deformacije kod hladnog valjanja uskih traka iz okrugle čelične žice, Tehnika br. 2, Beograd, 1977.



M. Jurković

ODREĐIVANJE GRANIČNE DEFORMABILNOSTI  
METALA U FUNKCIJI NAPONSKIH STANJA

Granična deformabilnost metala je jedan od osnovnih pokazatelja optimalnosti tehnologije obrade deformisanjem. Pri istraživanju granične deformabilnosti metala u funkciji naponskog stanja primjenjene su tri različite tehnološke metode: matrično izvlačenje, valjačko izvlačenje i valjanje uske trake. Izvedeno istraživanje pokazuje da primjenom optimalne šeme komponenata glavnih napona znatno raste potencijal deformabilnosti metala, što ima izuzetan značaj u projektovanju tehnologije obrade, alata i obradnih sistema.

M. Jurković

DETERMINATION OF THE FORMABILITY LIMIT LINE  
BY MEANS OF THREE DIFFERENT STRESS-STATE

S u m m a r y

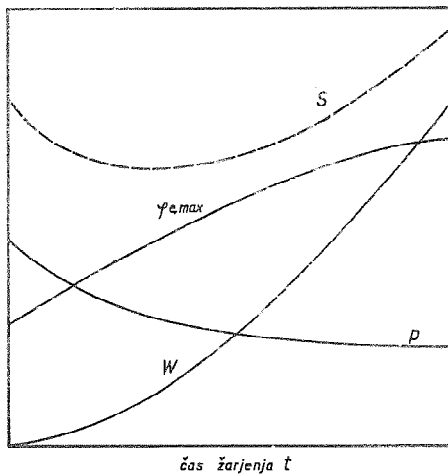
The formability limit of metal is one of basic indicators of optimal technology of deformation processing strain. During research of formability limit of metal in function of the voltage state the three different technological methods have been applied: matrix drawing, rolling drawing and rolling of the narrow band. This kind of research shows that by using an optimal scheme of main voltage components the potential of metal formability substantially increases, which has an exceptional importance in projecting the technology treatment, toolings and working systems.

K.Kuzman, B.Ule, D.Zalar<sup>\*)</sup>

## OCENA SPOSOBNOSTI ŹICE ZA PREOBLIKOVANJE V HLADNEM STANJU

## 1. UVOD

Sodobno, raunalniško podprto naartovanje tehnologij, priprava ali kompleksno vodenje proizvodnje, optimiranje stroškov, zahteva solidno poznavanje preoblikovalnih karakteristik materialov. Tako je potrebno vnaprej vedeti, kakšen je optimalni proces toplotne obdelave, da bodo orodja obremenjena še znotraj dopustnih mej, da bo mogoče doseči predvidene deformacije ter, da bodo celotni stroški proizvodnje čim manjši. Takšno, celostno optimiranje je trenutno še nedosegljiv cilj, toda počasi, po segmentih pa ga moramo začeti obdelovati (sl.1).



Slika 1: Optimiranje preoblikovalnih procesov toplotne obdelave (t-čas žarjenja, p-specificni pritisk na orodje,  $\varphi_{e,max}$ -največja možna deformacija, W-energija za toplotno obdelavo, S-celotni stroški proizvodnje).

<sup>\*)</sup> dr.Karl Kuzman,dipl.inž., docent, Fakuleta za strojništvo v Ljubljani, Murnikova 2  
 mag.Boris Ule,dipl.inž., samostojni raziskovalec, Slovenske Źelezarne - Metalurški institut, Ljubljana, Lepi pot 11  
 Damijan Zalar,dipl.inž., stažist - raziskovalec, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, Murnikova 2

V naših predhodnih raziskavah /1/ smo ugotovili, da se da ravno na področju toplotne obdelave veliko prihraniti ob pogoju, da dovolimo nekoliko večje obremenitve ter s tem ustrezno manjšo življenjsko dobo orodij.

V pričujočem delu bomo predstavili rezultate raziskav domače žice JMP - 10 (jeklo za masivno preoblikovanje), ki smo jo toplotno obdelali na različne načine, nato vnaprej ocenili njene preoblikovalne lastnosti ter to potrdili z neposrednim tehnološkim preizkusom.

## 2. TOPLOTNA OBDELAVA IN KRIVULJE PLASTIČNOSTI

Jeklo JMP - 10 je namenjeno za preoblikovanje v hladnem ob pogojih velikih deformacij. To mu omogočajo nizke vsebnosti ogljika in ostalih elementov. V našem primeru je žica imela sledečo kemično sestavo:

0,087 %C, 0,08 %Si, 0,33 %Mn, 0,013 %S, 0,027 %P, 0,029 %Al, 0,0073 %N.

Pri načrtovanju toplotnih obdelav smo se naslonili na predhodno raziskavo jekla JMP - 10 /2/, kjer so bile ugotovljene spodnje rekristalizacijske temperature predhodno hladno reduciranih žic.

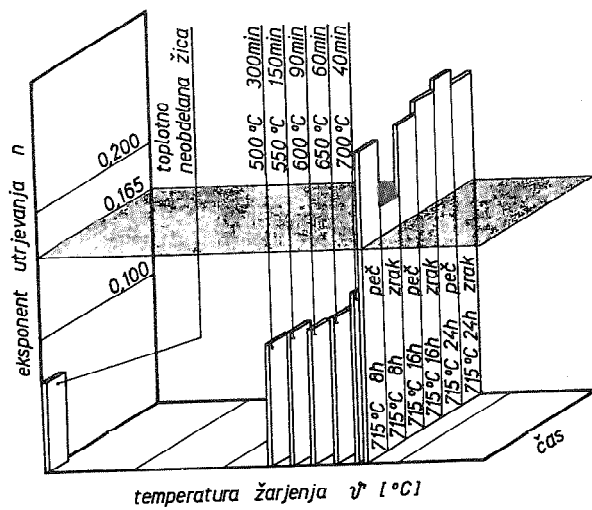
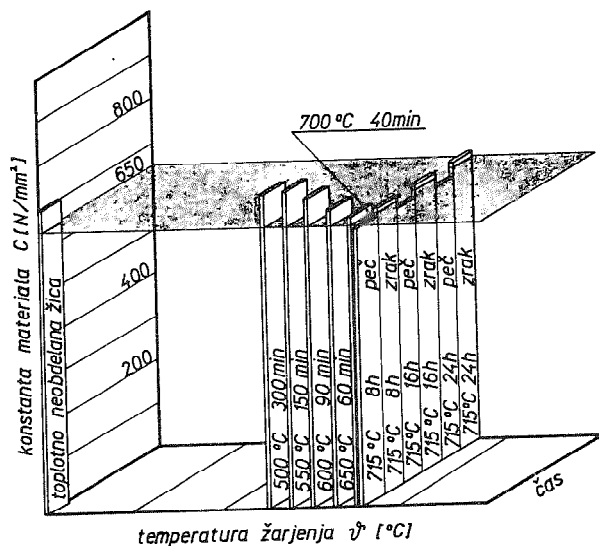
Pri višjih temperaturah je rekristalizacija hitrejša, zato smo temu ustrezno določili tudi žarilne čase (dodali smo 15 minut za segrevanje vzorcev na temperaturo).

Poleg rekristalizacijskih žarjenj smo izvedli tudi sferoidizacijska žarjenja pri temperaturi 715 °C (988 K) in različno dolgih časih. Po opravljenih toplotnih obdelavah pa smo za vse vzorce s tlačnim preizkusom določili krivulje plastičnosti /3/ ter z ustrezno računalniško obdelavo poiskali aproksimativne funkcije oblike:

$$\sigma_F = C \cdot \varphi_e^n \quad /N/mm^2/ \quad (1)$$

Konstante materiala C ter eksponent deformacijskega utrjevanja n sta veličini, s katerima je mogoče analitično obravnavati preoblikovalne procese, sklepati na preoblikovalno sposobnost, določevati obremenitve orodij, vrednotiti uspešnost toplotnih obdelav, ... Iz slike 2 lahko vidimo, kako različni načini toplotne obdelave vplivajo na navedeni konstanti.

V naših predhodnih raziskavah /4/ smo ugotovili, da bi konstanta C in eksponent n moral biti:  $C < 650 N/mm^2$ ,  $n > 0,165$  kar je v sliki 2 podano kot izhodišče.



Slika 2: Konstante materiala  $C$  ter eksponenti utrjevanja  $n$  za žice JMP-10 v dobavljenem stanju ter po različnih načinih toplotne obdelave.

Glede na navedeni meji lahko ugotovimo, da tej zantevi skoraj v celoti ustrezajo le sferoidizacijsko žarjeni vzorci. Rekristalizacijsko žarjenje pri višjih temperaturah sicer zmanjšuje konstanto C, toda eksponent utrjevanja ostaja dokaj nizek. Nadalje lahko ugotovimo, da podaljšanje časov sferoidizacijskega žarjenja bistveno ne vplivata zmanjševanje konstante C ter povečevanje eksponenta n.

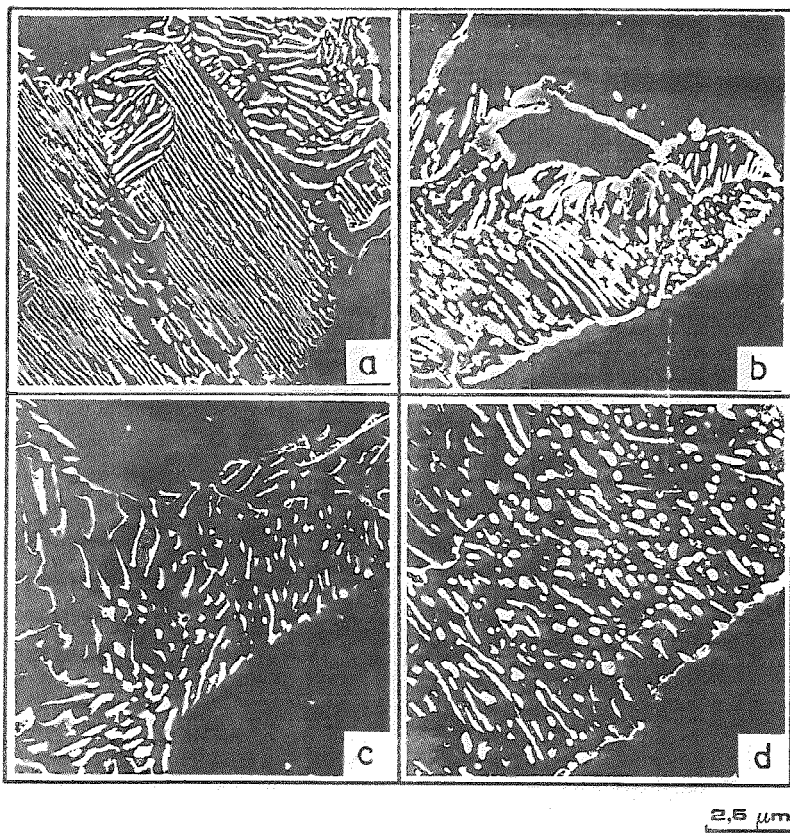
### 3. MIKROSTRUKTURNE PREISKAVE

Mikrostrukturne preiskave smo opravili s scanning elektronskim mikroskopom, ker le tako dobimo veljavne podatke o medlamelarni razdalji v perlitu ali podatke o stopnji sferoidizacije cementita. Stopnjo deformacije žice v hladnem ali celo rekristalizacije pa bolje opredelimo s klasično metalografsko tehniko.

Na sliki 3a je prikazana mikrostruktura izhodne žice JMP-10 ter taiste žice, ki je bila na različne načine rekristalizacijsko žarjena (sl. 3b, c in d). Žica, ki je bila v izhodnem stanju deformirana v hladnem za  $\epsilon_A = 0,15$  do  $0,20$  ima feritno-perlitno mikrostrukturo s povsem lamelarnim perlitom. Z zviševanjem temperature rekristalizacijskega žarjenja, žica najprej deloma, nato pa popolnoma rekristalizira (sl. 3c), pri tem pa pride tudi do sferoidizacije. Žica, ki je bila rekristalizacijsko žarjena 40 minut pri  $700\text{ }^\circ\text{C}$  ima že povsem pravilna poligonalna zrna rekristaliziranega ferita, cementit pa je v dobršni meri sferoidiziran (sl. 3d). Verjetno je prav delna sferoidizacija rekristalizacijsko žarjenih žic vzrok njihove relativno izboljšane preoblikovalnosti.

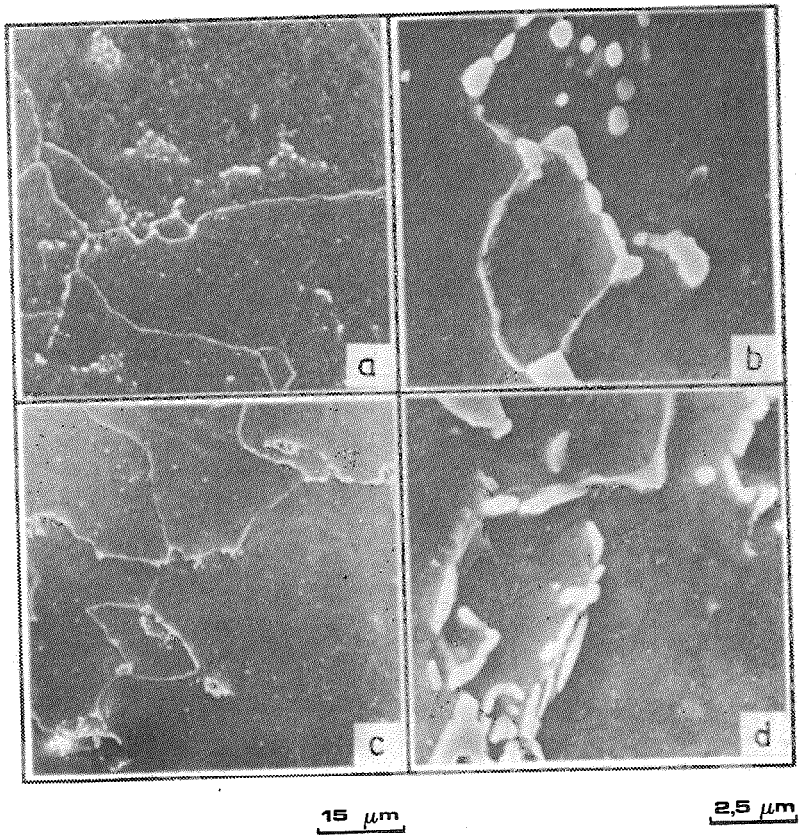
Mikrostruktura sferoidizacijsko žarjenih žic je prikazana na sliki 4 in sicer tako žice, ki je bila žarjena 8 ur pri  $715\text{ }^\circ\text{C}$  ter ohlajena na zraku (sl. 4a, b), kot tudi žice, ki je bila žarjena 24 ur pri  $715\text{ }^\circ\text{C}$ , ter počasi ohlajena v peči (sl. 4c in d). Očitno je, da je (predhodno hladno deformirana) žica povsem sferoidizirana že po osmih urah žarjenja pri  $715\text{ }^\circ\text{C}$ , verjetno pa že tudi v mnogo krajšem času, zato podaljšano žarjenje ne prispeva mnogo k izboljšanju preoblikovalnosti. To nenazadnje dokazuje tudi podobnost mikrostruktur na slikah 4a in b s slikami 4c in d. Pač pa se izkaže - in to poučno dokazuje slika 2 - da s počasnim ohlajanjem po sferoidizacijskem žarjenju dosežemo boljše lastnosti, kot pa z naglim ohlajanjem na zraku. Vzrok za to moramo verjetno iskati v nižjih ravnotežnih koncentracijah ogljika v feritu, doseženih s počasnim ohlajanjem v peči.

Vsekakor iz slike 2 lahko ugotovimo še, da samo rekristalizacijsko žarjenje, z le delno sočasno sferoidizacijo cementita, ne povzroči zadostnega povečanja eksponenta deformacijskega utrjevanja t.j. povečanja enakomernega raztezka pri natezanju, da bi bile lahko rekristalizacijsko žarjenje žice brez zadržkov vedno



Slika 3: Mikrostruktura izhodne ter rekristalizacijsko žarjenih žic

- a) izhodna žica JMP-10
- b) rekristalizacijsko žarjeno 90 min. pri 600 °C
- c) rekristalizacijsko žarjeno 60 min. pri 650 °C
- d) rekristalizacijsko žarjeno 40 min. pri 700 °C.



Slika 4: Mikrostruktura sferoidizacijsko žarjenih žic

- a) sferoidizacijsko žarjeno 8 ur pri 715 °C ter ohlajeno na zraku
- b) mikrostruktura iz slike a, vendar pri večji povečavi
- c) sferoidizacijsko žarjeno 24 ur pri 715 °C ter ohlajeno v peči
- d) mikrostruktura iz slike c, vendar pri večji povečavi.

uporabne. Izbira primerne toplotne obdelave žice bo seveda slejkoprej zavisela od tehnoloških zahtev preoblikovalnega postopka ter stroškov za porabljeno energijo.

#### 4. TEHNOLOŠKI PREIZKUS

Tlačni preizkus, dobljene konstante  $C$  in  $n$  že omogočajo, da z metodami plastomehanike izračunamo sile ter pritiske na orodja ter s tem vnaprej ugotovimo, katere toplotne obdelave bi bile še dovolj dobre. Toda enostavne elementarne analitične metode so premalo natančne, da bi dovolj selektivno rangirale posamezne materiale, druge (npr. metoda končnih elementov, ...) pa še niso zasidrane v naši neposredni tehnološki praksi. Zato smo se odločili za vse primere toplotnih obdelav opravimo še eksperimente protismernega iztiskovanja.

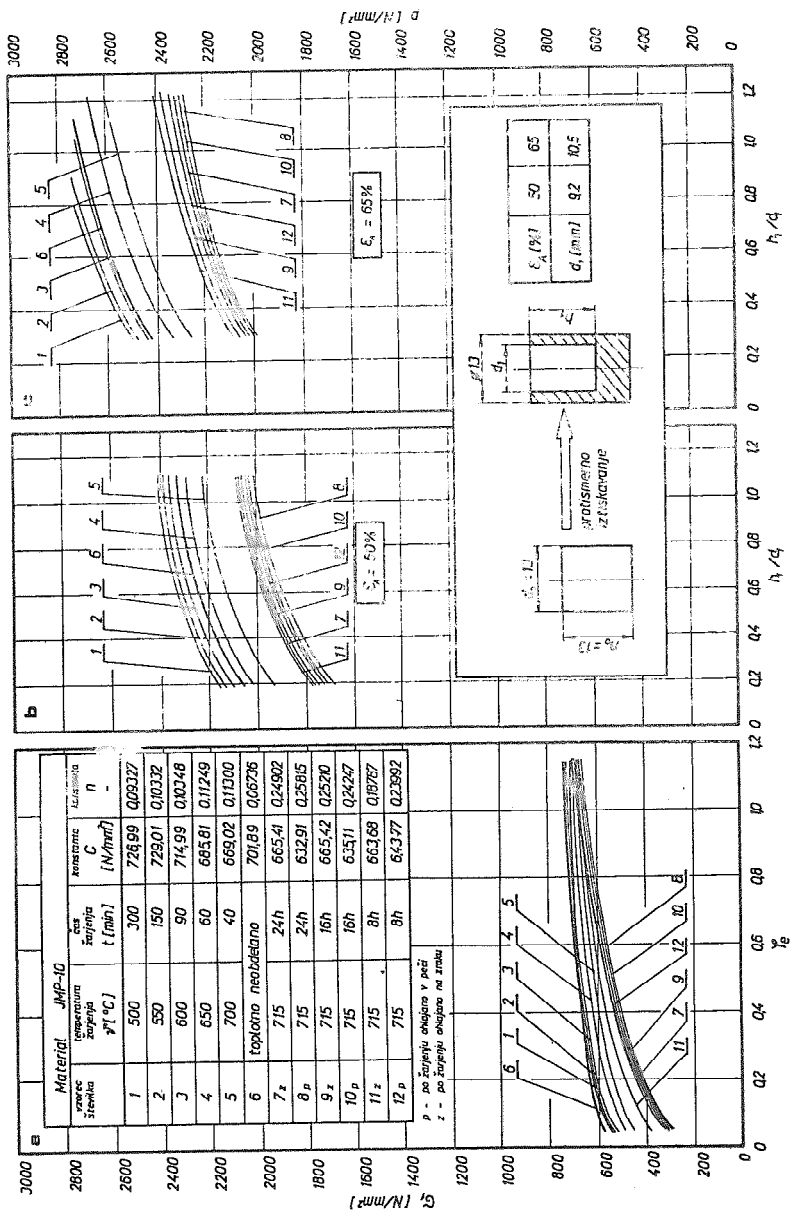
Surovce smo pred iztiskavanjem površinsko obdelali z Zn-fosfatom, nato pa namilili z milom Bonderlube. Eksperimente smo opravili pri dveh različnih specifičnih deformacijah prečnih presekov, da bi končno dobili čim bolj zanesljive informacije o materialih.

Rezultati preizkusov so skupaj s krivuljami plastičnosti podani v sliki 5. Iz nje vidimo, da je zaporedje krivulj  $p(h_1/d_1)$  enako zaporedju krivulj  $\sigma_f(\varphi_0)$ . Posebno zanimiva je lega krivulj za toplotno neobdelano žico (št.6). Glede na nizek eksponent utrjevanja je njena krivulja plastičnosti položena in pri malih deformacijah najvišja. Če pa gledamo napetosti tečenja pri večjih deformacijah ( $\varphi_0 > 0,8$ ) tedaj vidimo, da so te višje po rekristalizacijskih žarjenjih pri 500, 550 in 600 °C, kot pa, če žarjenja sploh ne bi bilo.

Enako zaporedje kot pri  $\sigma_f(1,2,3,6)$  smo dobili tudi pri obeh skupinah eksperimentov protismernega iztiskovanja. Tudi tukaj se je pokazalo, da je rekristalizacijsko žarjenje slabo vplivalo na pritiske pri iztiskavanju.

Druga skupina krivulj obravnava vpliv časa mehkega žarjenja. Tu je zaporedje predvsem logično  $\sigma_f$  in  $p$  so tem manjši, čim daljši so časi žarjenja. Od načinov ohlajanja pa je počasno ohlajanje v peči bistveno boljše od hitrejšega na zraku. Nadalje lahko vidimo, da je pas, v katerem ležijo vse krivulje dokaj ozek, zato so dolgi časi žarjenja vprašljivi z ekonomsko stroškovnega stališča.





Slika 5: Krivulja plastičnosti (a) ter specifični pritiski (b, c) pri protismernem iztiskavanju različno toplotno obdelanih žic iz JMP-10.

## 5. SKLEP

V delu smo prikazali vpliv toplotne obdelave na predhodno hladno deformirano ( $\epsilon_A \approx 0,20$ ) žico iz JMP-10. Ugotovili smo, da je za nadaljnje hladno masivno preoblikovanje najugodnejše, če jo mehko žarimo 8 ur pri 715 °C, nato pa v peči počasi ohlajamo. Daljši časi pa stroškov žarjenja ne opravičujejo s sicer nekoliko nižjimi obremenitvami orodij.

Nadalje smo s tehnološkim preizkusom ugotovili, da je krivulja plastičnosti dovolj zanesljiv podatek za vnaprejšnjo oceno preoblikovalnih sposobnosti materialov.

Iz slike 5 je mogoče razbrati veliko podobnost med poteki krivulj  $\sigma_f(\varphi_e)$  in  $p(h_1/d_1)$ . To nam omogoča, da na podlagi podobnosti določimo konstante procesov kot:

$$K = \frac{P}{C} = f(h_1/d_1),$$

ki nam omogočajo (ob pogojih geometrijske podobnosti) dovolj zanesljivo sklepanje o pritiskih na orodje, če smo spremenili material, toplotno obdelavo, poznamo pa novo krivuljo plastičnosti /5/.

## Literatura

- /1/ Kuzman, K., Kosec, L.,: Energy saving problems in cold forging processes. Wire 38(1988), 6, 605-610.
- /2/ Kveder, A., Razinger, A.: Rekrystalizacija jekel za hladno masivno preoblikovanje Že Zb 11(1977), 4, 179-191.
- /3/ Kuzman, K.: Uporabnost tlačnega preizkusa za ugotavljanje nekaterih preoblikovalnih lastnosti jekel. VII Savet.proizv.maš.Jugosl., Novi Sad, M.34.01-10.
- /4/ Kuzman, K., Razinger, A.: Posebnosti jekel za hladno masivno preoblikovanje. Že Zb 11(1977), 3, 135-144.
- /5/ Kuzman, K., Kosec, L., Vojnovič, N.: Prispevek h kriterijem za ocenjevanje primernosti jekel za hladno vtiskavanje. XIV.Savet.proizv.maš.Jugl, Čačak 1980, 57-67.
- /6/ Ule, B., Kuzman, K., Lagoja, A., Lazar, D., Legar, F., Vojnovič, N., Žvokelj, J.: Študij vpliva sestave, strukture in teksture žice na njeno preoblikovalnost v hladnem - II.del. Naloga 88-057. Metalurški institut, Ljubljana 1988.

K.Kuzman, B.Ule, D.Zalar

#### **BEWERTUNG DER KALTUMFORMBARKEIT VON DRAHT**

##### **Z u s a m m e n f ä s s u n g**

Im Beitrag werden Untersuchungsergebnisse der Wärmebehandlung von Draht (vorher leicht kaltgezogen) auf die Fliesskurve, sowie auf die spezifische Belastung des Stempels beim Rückwärts- Kaltfliesspressen erörtert.

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass das Rekristallisationsglühen ungeeignet war, die Belastungen der Werkzeuge waren sogar grösser als beim gleichen Draht ohne Wärmebehandlung. Unter den Weichglühverfahren sind diejenigen optimal, bei denen der Werkstoff langsam im Ofen abgekühlt wird. Für den behandelten Draht (0,087% C) ist es auch nicht sinnvoll, die Glühzeiten unnötig zu verlängern.

K.Kuzman, Z.Kampuš\*)

ENERGETSKO VREDNOTENJE OBDELOVALNIH PROCESOV

1. UVOD

Energetski problematiki se v naši domovini posveča premalo pozornosti. Energijo samo smatramo kot strošek, ki predstavlja le majhen delež v končni ceni izdelka. V primerih suše, ostrih zim, izpada elektroenergetskih objektov, deviznih problemov pri uvozu energetskih surovin, pa se stanje na področju energetike bistveno spremeni. Energije ni, potrebne so redukcije, škode v narodnem gospodarstvu so ogromne.

Gradnja novih energetskih objektov, ki bi naj držala razmerje med porabo in potrošnjo, je velikokrat problematična in to s finančnega ter najširše ekološkega vidika. Zato je veliko bolj smotrno (česar se v svetu že dolgo zavedajo), da se z energijo čim bolj racionalno ravna. Kolike rezerve so na tem področju, potrjujejo različni viri ter izjave naših energetikov, ekologov (npr. v Naših razgledih), da Jugoslavija troši od 5 do 10 krat več energije na enoto proizvoda, kot to porabijo v tehnično razvitih državah.

V našem delu bi se omejili le na en segment porabe energije, to je na energetsko vrednotenje obdelovalnih procesov. Pri načrtovanju novih tehnoloških postopkov ali pri analizi obstoječih, bi se morali nujno vprašati, kolika je poraba energije in, če je le ta znotraj normalnih okvirov.

Energetsko vrednotenje posameznih tehnoloških procesov je zbrano v tabeli 1. Iz nje vidimo, da najmanj energije na enoto mase porabimo pri postopkih odrezovanja,

\*) dr.Karl Kuzman,dipl.inž., docent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani,  
Murnikova 2  
Zlato Kampuš,dipl.inž., asistent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani,  
Murnikova 2

2. Energetsko osveščene dežele ne izvažajo kovinskih polizdelkov, ker je v nje vloženo veliko energije, ki ni v sorazmerju z njihovo ceno.

Z raziskavami porabe energije se na Fakulteti za strojništvo ukvarjamo že vrsto let. Tako smo se leta 1985 predstavili domači javnosti /5/, naše delo pa je bilo ugodno ocenjeno tudi v tujini /6/. Nadalje imamo že nekaj rezultatov iz neposredne industrijske prakse, kjer smo s skrbno energetsko analizo preoblikovalnih procesov uspeli priti do velikih prihrankov, ne da bi pri tem trpela tehnologija, oprema ali kvaliteta izdelkov.

## 2. KONKRETNA ENERGETSKA ANALIZA

Energetsko analizo je mogoče najbolj nazorno prikazati na konkretnem primeru. V ta namen bomo obravnavali tri možnosti izdelave zavornega bata, kar je bila tema ene od naših nalog za neposredno prakso. Analizirali smo tri tehnologije:

- I - hladno masivno preoblikovanje
- II - preoblikovanje debele pločevine
- III - obdelava z odrezovanjem

Tehnologiji preoblikovanja sta prikazani na sliki 1, odrezavanje pa je sestavljeno iz operacij vrtanja in struženja. Izkoristki materiala za posamezne operacije so bili:

I - hladno masivno preoblikovanje	95%
II - preoblikovanje debele pločevine	70%
III - obdelava z odrezovanjem	30%

Porabe energije za toplotno obdelavo ter fosfatiranje zajemajo celotno energijo naprav, ki smo jih ugotovili v naših predhodnih raziskavah /5,6/. Porabe energij za vrtanje, struženje ter vseh operacij preoblikovanja so izračunane le za sam proces, brez upoštevanja izgub v strojih. Zato smo teh energij preračunali s celotnim izkoristkom strojev  $\eta = 0,25$ , kjer so upoštevani tudi zagon in prosti tek. Tu relativno grob in sigurno nenantančen poseg pa v končni analizi ni imel večjega vpliva.

Razčlemba strukture porabljenih energij (tabela 2) kaže, da je daleč najbolj pomembna primarna energija, to je energija za pripravo surovoa.

Pri hladnem masivnem preoblikovanju so preoblikovalne operacije udeležene z 9%, toplotna obdelava (mehko žarjenje 8 ur na 715 °C) predstavlja 4,5%, fosfatiranja pa 1%.

Tabela 1: Okvirne vrednosti specifičnih porab energije  $e$  pri postopkih izdelave in predelave jekla.

		$e$ (MJ/kg)
-----		
A. Izdelava polizdelkov	/1/	
primarno oblikovanje		36
preoblikovanje polizdelkov		3
B. Obdelava s preoblikovanjem	/2/	
hladno iztiskavanje		2
poltoplo iztiskavanje		2
utopno kovanje		3
C. Obdelava z odrezavanjem, odvzemanjem	/1,2/	
struženje		0.5
plano freziranje		0.5
vrtanje		0.5
posnemanje		0.3
plano brušenje		3.5
elektrokemična obdelava (ECM)		47
elektroerozivna obdelava (EDM)	/3/	38
D. Sinter	/4/	
priprava prahu		10
sintranje in kalibriranje		16.5
-----		

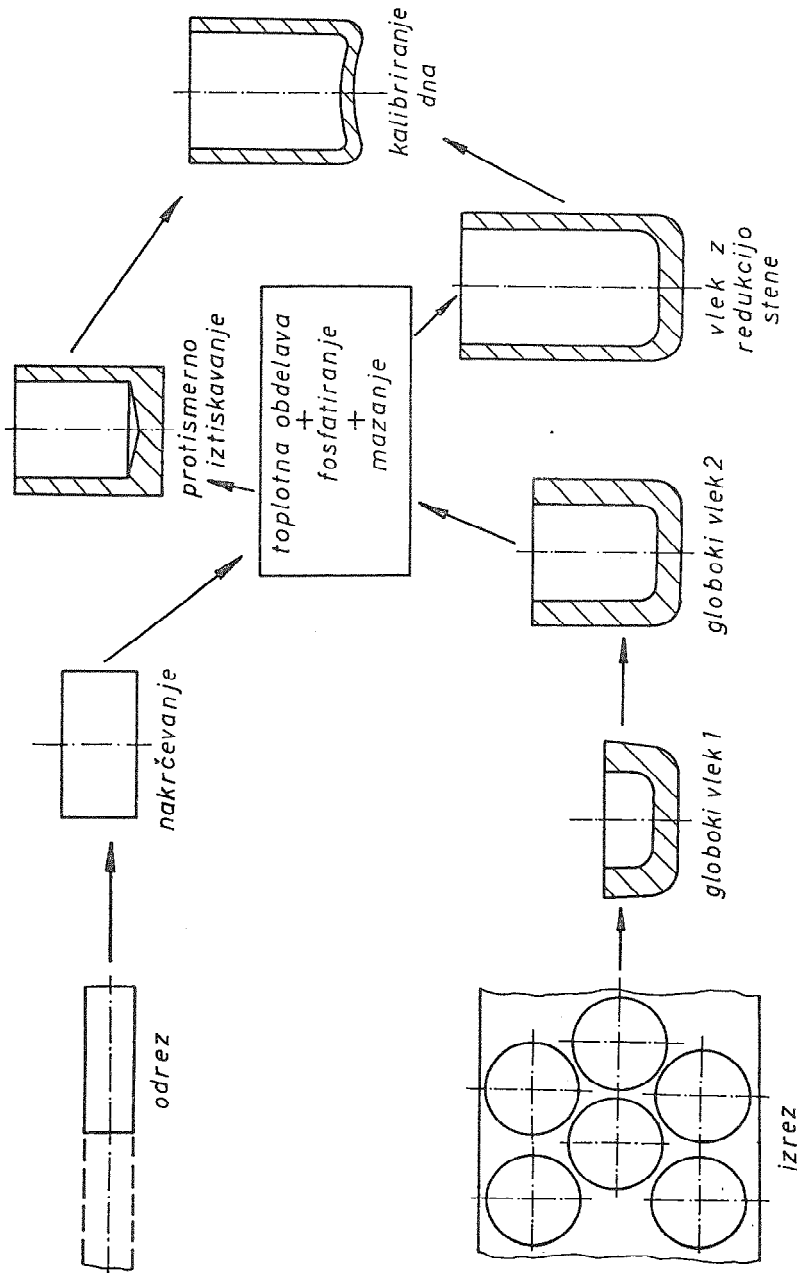
največ pa za primarno oblikovanje (metalurška priprava) ter, razumljivo, za elektrokemično raztapljanje.

Ako pa se vprašamo, koliko energije smo v celoti porabili za to, da smo napravili nek izdelek, kolika je poraba energije na maso izdelka, tedaj se slika bistveno spremeni. Postopki z odrezavanjem postajajo energetske veliko bolj potratni, kajti energija se troši za izdelavo odpadkov, ostružkov, istočasno pa smo za primarno izdelavo teh odpadkov porabili veliko energije.

Pri obdelavi z odrezavanjem, kjer gre npr. v ostružke 50% celotne mase, se v izdelek vložena energija več kot podvoji, ni več 39 MJ/kg (tabela 1) temveč okoli 80 MJ/kg. Ako bi isti izdelek napravili s preoblikovanjem ob 90% izkoristku materiala, tedaj bi bila celokupna specifična poraba energije okoli 45 MJ/kg.

Iz podatkov v tabeli 1 lahko zaključimo dvoje:

1. Varčevanje z energijo je varčevanje z materialom.



Slika 1: Možni tehnologiji za izdelavo zavornega bata.

Tabela 2: Energetska analiza postopkov izdelave bata za zavore  
(m - masa; e, E - specifična energija)

## I - hladno masivno preoblikovanje

	m /kg/	e /MJ/kg/	E /MJ/kos/	indeks /%/	
1. surovec	0.67	36	24.12	91.61	85.38
2. toplotna obd.	0.64	2	1.28	4.86	4.53
3. fosfatiranje	0.64	0.46	0.29	1.10	1.03
4. preoblikovanje:					
- odrez					
- nakrčevanje	0.64	1.00	0.64	2.43	9.06
- protism. izt.					
- kalibriranje					
A skupaj za kos	0.64	41.14	26.33	100.00	-
Ob upoštevanju energetskih izkoristkov strojev ( $\eta = 25\%$ )					
B skupaj za kos	0.64	45.14	28.25	-	100.00

## II - preoblikovanje debele pločevine

	m /kg/	e /MJ/kg/	E /MJ/kos/	indeks /%/	
1. surovec (tri rondele v vrsti)	0.92	35	32.20	95.32	95.20
2. toplotna obd.	0.64	2	1.28	3.79	3.70
3. fosfatiranje	0.64	0.46	0.29	0.86	0.80
4. preoblikovanje:					
- izrez					
- 1. vlek					
- 2. vlek	0.64	0.01	0.01	0.03	0.12
- redukcija stene					
- kalibriranje					
A skupaj za kos	0.64	52.78	33.78	100.00	-
Ob upoštevanju energetskih izkoristkov strojev ( $\eta = 25\%$ )					
B skupaj za kos	0.64	52.85	33.81	-	100.00



## III - obdelava z odrezovanjem

	m /kg/	e /MJ/kg/	E /MJ/kos/	indeks	
				/%/	/%/
1. surovec	1.77	36	63.72	99.13	96.60
2. vrtanje	0.96	0.5	0.48	0.75	2.91
3. struženje	0.17	0.5	0.08	0.12	0.49
A skupaj za kos	0.64	100.93	64.28	100.00	-
Ob upoštevanju energetskega izkoristka strojev ( $\eta = 25\%$ )					
B skupaj za kos	0.64	103.04	65.96	-	100.00

Preoblikovanje debele pločevine je karakteristično po tem, da je energija za samo preoblikovanje skoraj zanemarljiva (0,12%). Relativno velika celokupna poraba energije (33,81 MJ/kos) pa je takšna zaradi slabega izkoristka materiala. Če bi pri tej tehnologiji rešili problem razreza (izkoriščenje odpadka za druge izdelke) bi dobili energetsko najugodnejšo rešitev. Z ozirom na nove možnosti pir preoblikovanju debelih pločevin /7/ pa bo mogoče delati z manjšim številom operacij, kot pa je to prikazano v sliki 1.

## 3. SKLEP

S prispevkom smo želeli opozoriti na eno od tem, ki bo v bližnji prihodnosti zelo aktualna, ko bomo prisiljeni v kompleksno analizo našega celotnega industrijskega delovanja. V analizi nismo opozorili na dejstvo, da so moderni obdelovalni stroji, ki so povezani v tehnološke celice oziroma enote, energetsko izredno potratni, če niso polno izkoriščeni, če so na njih pogosti zastoji, prekinitve.

Končno bi želeli predlagati, da se režimi toplotne obdelave surovcev oziroma medfaznih izdelkov naj ne predpisujejo šablonsko in z velikimi rezervami temveč, da naj bodo predpisi fleksibilni, prilagodljivi na stanje oziroma vsake posamezne pošiljke jekla /6/.

## 4. LITERATURA

- /1/ Kellock, B.C.: Energy conservation in manufacturing. Mach. and prod. eng. 1976, 7, 13 ... 17.
- /2/ Lange, K.: Energieeinsparung und Fertigungstechnik. wt-Z. ind. Fertig. 68(1987), 9, 535 ... 537.
- /3/ Peklenik, J. in sodelavci: Sodobna tehnika odrezavanja in njene razvojne smeri, Strojniški vestnik, 13(1967), 2, 65 ... 79.
- /4/ Zapf, G.: Optimale Rohstoff - und Energienutzung bei der Verwendung von Sinterbonteilen. VDI Berichte Nr. 277, 1977.
- /5/ Kuzman, K., Cekuta, B.: Poraba energije pri procesih hladnega masivnega preoblikovanja, XIX. Savet. proizv. maš. Jugoslavije, Kragujevac, 1985.
- /6/ Kuzman, K., Kosac, L.: Energy saving problems in cold forging processes. Wire 38(1988), 605-610 in 20<sup>th</sup> Plenary Meeting ICFG, Poland 1987.
- /7/ Kampuš, Z.: Proces globokega vleka brez držala pločevine in stanjševalnega vleka s superponirano silo. III. seminar podiplomskega študija, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1988.

K. Kuzman, Z. Kampuš

#### ENERGIEMÄSSIGE BEWERTUNG DER FERTIGUNGSPROZESSE

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

Angesichts der aufkommenden energetischen und ökologischen Probleme ist es unbedingt erforderlich bei der Planung neuer und bei der Revision der bestehenden Fertigungsprozesse Energieanalysen durchzuführen.

In der Arbeit wird die Energieanalyse von drei verschiedenen Fertigungsverfahren (Kaltmassivumformen, Umformen von dicken Blechen und Bearbeitung durch Zerspanung) vorgestellt, die es ermöglichen, das gleiche Werkstück - Bremszylinderkolben - herzustellen. Die durchgeführte Analyse zeigt, dass das Problem der Energieeinsparung mit dem Problem der Werkstoffeinsparung verglichen werden kann. Das Umformen von dicken Blechen ist energiemässig am wenigsten intensiv nur unter der Bedingung, dass die Werkstoffausnutzung verbessert wird. Weiterhin bestehen gewisse Reserven auch noch in der Optimierung der Wärme- und Oberflächenbehandlung.



M.Stefanović,D.Adamović,M.Mitrović\*)

MODELIRANJE TRIBO-USLOVA PRI IZVLAČENJU SA  
STANJENJEM ZIDA KOMADA

1. UVOD

U skoro svim procesima obrade metala deformisanjem (OMD) radni komad je za vreme oblikovanja u kontaktu sa alatom, te se pri njihovom relativnom kretanju generišu smicajni kontaktni naponi;od raspodele i intenziteta smicajnih napona na površini komada zavisi i mogućnost plastičnog deformisanja, odnosno veličina aktivne sile, utrošak energije, vek alata, kvalitet površine dela i sl. Izučavajući na kompleksan način odnose između trenja, habanja i podmazivanja, tribološka istraživanja procesa OMD pokazuju izuzetan značaj ove oblasti, i čine je ravnopravnom sa ostalim segmentima obradnog sistema (mašina, alat, materijal).

Poznato je da se deformisanje metala odvija u uslovima visokih normalnih napona. Odsustvo maziva u takvim uslovima dovodi do neposrednog kontakta materijala i alata, odnosno do lepljenja mekšeg materijala na tvrdi alat, čime se bitno narušava stabilnost procesa obrade. Pravilan izbor triboloških uslova i identifikacija graničnih odnosa na kontaktnim površinama omogućava kontrolisano tečenje metala u tankom površinskom sloju, što čini proces OMD efikasnim.

2. ANALIZA I IZBOR TRIBO-MODELA

Pri izvlačenju sa stanjenjem zida komada dobijaju se delovi znatne visine u odnosu na prečnik, sa dnom veće debljine od debljine zida. Pri obradi,

---

\*) Dr Milentije Stefanović, docent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul.S.Janjić 6, Kragujevac  
Dragan Adamović, dipl.ing.,asistent-pripravnik Mašinskog fakulteta u Kragujevcu  
Milorad Mitrović, dipl.ing.,FNP,"Zavodi Crvena zastava",Kragujevac

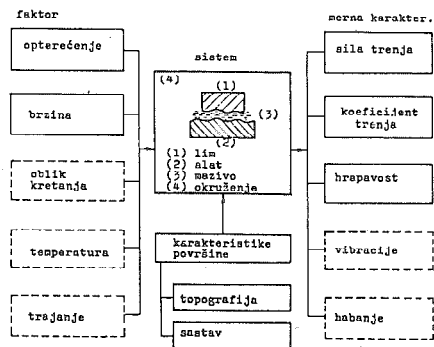
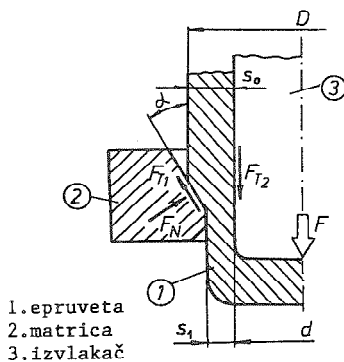
koja je najčešće višefazna za jedan radni hod, unutrašnji prečnik se neznatno menja. Ovaj postupak izvlačenja, posebno mehanika deformisanja (deformaciona sila, optimalni uglovi prstenova za izvlačenje, raspored prstenova, granična deformabilnost i sl.) bili su predmet brojnih istraživanja /1/,/2/,/3/ i dr.

Modeliranje triboloških uslovi pri izvlačenju sa stanjenjem podrazumeva zadovoljavanje minimuma potrebnih kriterijuma s obzirom na: sličnost u naponsko-deformacionim karakteristikama, temperaturno-brzinske uslove, osobine površina alata i materijala /4/.

Shema procesa izvlačenja je pokazana na sl.1., sa opštim prikazom sila trenja u kontaktu komada i matrice, odnosno izvlakača. Sile trenja u zoni deformisanja imaju različit uticaj; na spoljašnjoj površini ove sile ( $F_{T1}$ ) povećavaju napone zatezanja, a na unutrašnjoj ( $F_{T2}$ ) rasterećuju opasan presek, umanjujući napone u zidu dela koji se izvlači. To je glavni razlog za postizanje visokih stepena deformacije i ostvarivanje znatnih priraštaja relativne visine pri izvlačenju /1/,/5/.

Stanjenje se realizuje u uslovima koji su bliski ravanskom deformacionom stanju. Uvećanje trenja u zoni izvlakača umanjuje kritični zatežući napon, ali se ukupna sila izvlačenja povećava. Pri ovome sila  $F_{T2}$  ne sme porasti toliko da se na kontaktnoj površini komada javljaju gruba zadiranja i nalepljivanja čestica metala na alat.

Generalna shema tribo-modeliranja sa prikazom osnovnih uticaja pri ispitivanju je pokazana na sl.2 /6/.

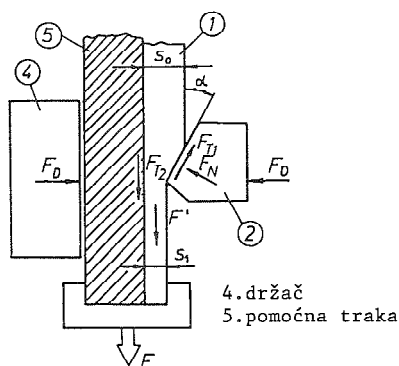


Sl.1. Shema izvlačenja sa stanjenjem Sl.2. Parametri relevantni pri tribo-ispitivanju

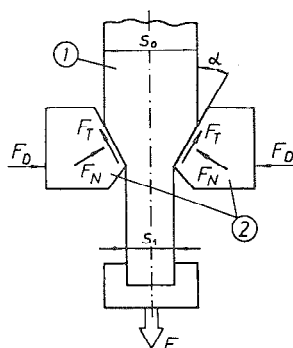
Kao pogodni parametri u ovim ispitivanjima usvojeni su - sila modelnog izvlačenja (provlačenja), koeficijent trenja i površinska hrapavost; veličine kao što su: habanje, vibracije, temperatura i sl. nisu relevantne u ovim merenjima.

Fundamentalna istraživanja Vejlera i Lihtmana /7/ u ovoj oblasti, na modelu dvougaoanog izvlačenja-provlačenja sa stanjenjem, pokazuju izuzetan značaj fizičko-hemijskih svojstava adsorpcionog sloja i maziva u uslovima graničnog trenja, karakterističnog za obradu deformisanjem u hladnom stanju.

Na sl.3. pokazan je tribo-model sa dve aktivne i različite kontaktne površine, čime se verno simuliraju odnosi pri stvarnom izvlačenju. Pomoćna traka (poz.5) se pri ispitivanju deformiše elastično, oponašajući uticaj izvlačača /8/.



Sl.3.Tribo-model stanjenja /8/



Sl.4.Tribo-model stanjenja /9/

Jednostavniji model, koji dvostrano-simetrično oponaša zonu kontakta sa matricom, pokazan je na sl.4. Ovaj model, razvijen pri istraživanju "galling"-pojave kod nerđajućih limova /9/, aluminijuma i sl. /11/, omogućava realizaciju visokih kontaktnih pritisaka i uvažava geometrijske uslove realnog procesa (ugao prstena - $\alpha$ ).

Model prema sl.4., primenjen u radu, zahteva merenje ukupne normalne sile (sila držača  $F_D$ ) i sile izvlačenja-provlačenja  $F$ . Na osnovu promene dimenzija epruvete, uz poznat ugao matrice  $\alpha$ , moguće je odrediti koeficijent trenja i srednji kontaktni pritisak:

$$\mu = \frac{(F/2F_D) - \operatorname{tg}\alpha}{1 + (F \cdot \operatorname{tg}\alpha / 2F_D)} \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{F \cdot \sin^2 \alpha + 2F_D \cdot \sin \alpha \cos \alpha}{b_0 \cdot (s_0 - s_1)} \quad (2)$$

gde je:

- $b_0$  - širina epruvete,
- $s_0$  - početna debljina epruvete,
- $s_1$  - debljina posle izvlačenja.

## 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

## 3.1. Uslovi ispitivanja

Ispitivani materijal je niskougljenični čelični lim, umiren aluminijumom, oznake Č.0148 P3, pogodan za plastičnu obradu. Mehaničke karakteristike, hemijski sastav i parametri hrapavosti su dati u tab.1. Kriva ojačanja ima oblik:  $K = 188,1 + 419 \cdot \varphi^{0,483}$ , MPa. Dimenzije epruvete koja se provlači su:  $s_0 \times b_0 \times l_0 = 3,03 \times 20 \times 200$  mm.

Karakteristike materijala Č.0148 P3

Tabela 1

MEHANIČKE		KARAKTERISTIKE		
Rp, MPa	Rm, MPa	Rp/Rm	A <sub>80</sub>	HV <sub>30</sub>
188,1	313,6	0,59	42,8	100,6
HEMIJSKI		SASTAV, %		
C	Mn	P	S	Al
0,06	0,24	0,01	0,012	0,052
PARAMETRI		HRPAVOSTI, μm		
Ra	Rt	Rq	Rp	Sm
1,16	6,5	1,41	4,4	130

Kontaktni par je od Č.5421, tvrdoće 60HRC, visokopoliran do srednje hrapavosti Ra = 0,06 μm. Ugao nagiba od 10° je izabran s obzirom na uslove ispitivanja (orijentacione vrednosti koeficijenta trenja, stepen deformacije) i preporuka /5/, /10/, /11/.

Brzina izvlačenja iznosi 20 mm/min; instalirani uređaj omogućava merenje i zapis dijagrama "sila-put klizanja". Detalji eksperimentalne metodologije izloženi su u radu /6/. Uslovi podmazivanja:

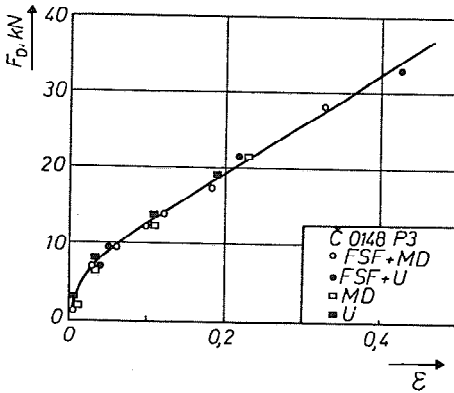
- 1) fosfatirane epruvete i molibden-disulfid (oznaka FSF+MD),
- 2) " " ulje za duboko izvlačenje (FSF+U),
- 3) nefosfatirane epruvete i " " (U),
- 4) " " molibden-disulfid (MD).

Dužina puta klizanja (dužina kontakta) iznosi 70 mm; merene vrednosti se uzimaju na njegovoj polovini.

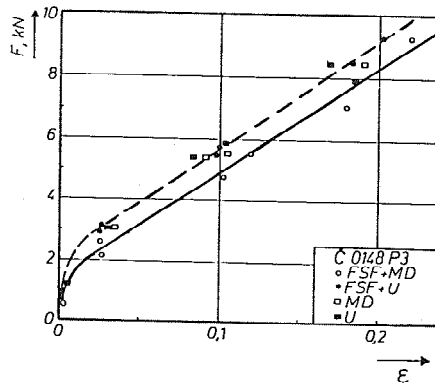
Praćenje karakteristika površine epruveta pri ispitivanju je vršeno na kompjuterizovanom mernom sistemu Talysurf 6 - TH, na kome je pored merenja svih relevantnih parametara hrapavosti moguća i statistička obrada rezultata i njegovo prikazivanje na monitoru, prostorno skeniranje površine, memorisanje, štampanje i crtanje.

## 3.2. Eksperimentalni rezultati

Stanjenje lima pri istoj sili držača ne zavisi od triboloških uslova u kontaktu, sl.5. Karakter promene sile provlačenja je analogan, sl.6., ali sa razlikama koje unosi sredstvo za podmazivanje, posebno pri kombinaciji 1): FSF+MD, kada se ostvaruju najniže vrednosti sile trenja. Naime, ukupnu silu provlačenja čine sile trenja i sila "idealnog" oblikovanja, koja isključivo zavisi od stepena deformacije.

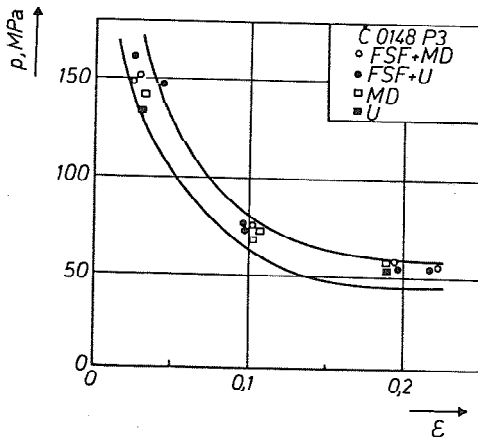


Sl.5. Promena sile držača sa stepenom stanjenja

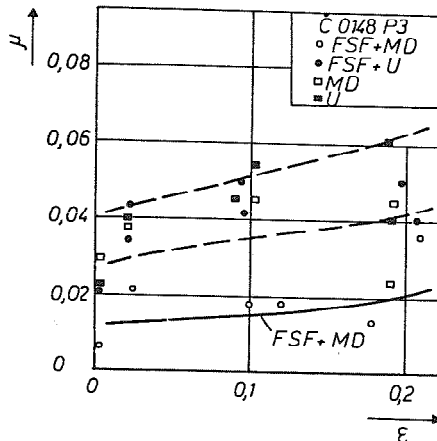


Sl.6. Promena sile provlačenja sa stepenom stanjenja

Uvrštavajući izmerene vrednosti u formulu (2), dobija se promena srednjeg pritiska u f-ji stepena deformacije, sl.7. Zbog bržeg porasta kontaktne površine od normalne sile, pri većim silama držača ostvaruju se manji pritisci i obrnuto. Izmena koeficijenta trenja sa porastom stanjenja, kao i veza sa srednjim pritiskom, pokazani su na sl.8. i sl.9.



Sl.7. Zavisnost spec. pritiska od stepena deformacije



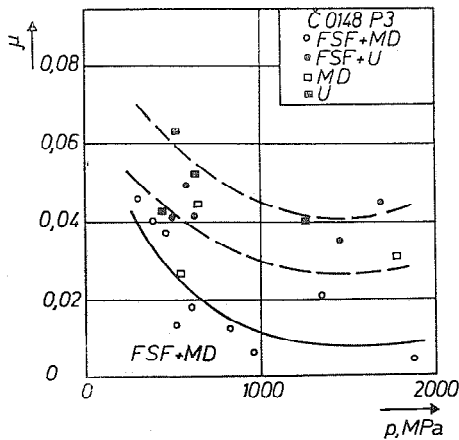
Sl.8. Zavisnost koef. trenja od stepena deformacije



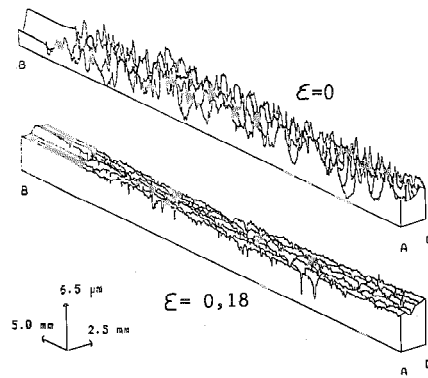
Kao očekivana posledica odnosa na sl.6., i ovde su vrednosti koeficijenta trenja za kombinaciju FSF+MD najniže. Ostale rezultate nije moguće pouzdano izdvojiti. Dobijene vrednosti ukazuju da se proces trenja odvija u tzv. uslovima "stalno niskog trenja", I tipa, po Kawai /8/. Kao posledica pogoršanja kontaktnih uslova, nastaju sledeće faze: II - porast nakon trenja tipa I, III - porast trenja, IV - stalno visoko trenje.

Trenje I tipa, koje je neophodno realizovati i u proizvodnim uslovima, obezbeđuje visok kvalitet površine komada i dovoljnu trajnost alata. Trenje ostalih tipova odvija se u uslovima mogućeg molekularnog zahvatanja metala u kontaktu i obrazovanja mikrovarova i nalepljivanja čestica na izvlakaču i matrici.

Na sl.10. dat je prostorni prikaz topografijepovršine pre i posle provlačenja, a na sl.11. i 12. pokazana je promena srednje ( $R_a$ ) i najveće hrapavosti ( $R_t$ ) u zavisnosti od stepena deformacije.



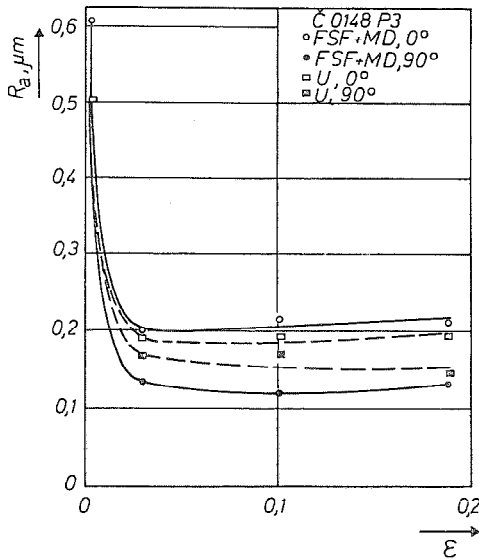
Sl.9. Zavisnost koef. trenja od pritiska



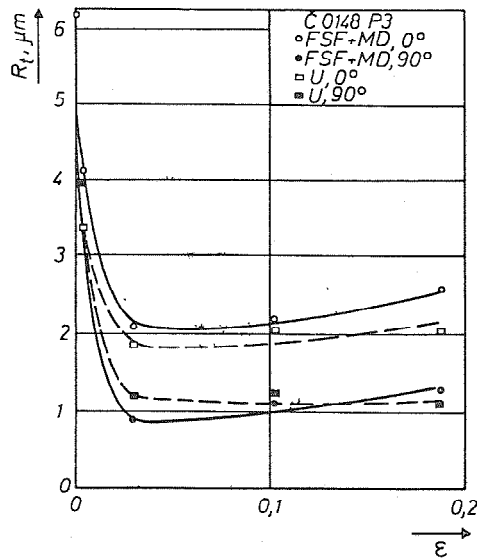
Sl.10. Promena topografije površine epruveta

Promene parametara  $R_a$  i  $R_t$ , između kojih postoji korelacija, pokazuju da do bitnog izravnjavanja pikova površinske hrapavosti dolazi već pri nižim stepenima stanjenja. Promena krive nošenja i raspodela amplituda za topografije prema sl.10. pokazana je na sl.13. i sl.14.

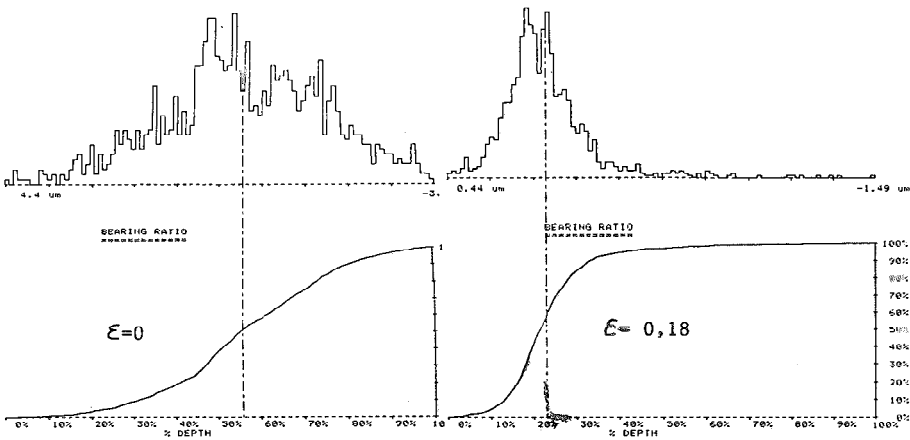
Prema prikazima na sl.13. i sl.14. površina nošenja od 50% pri  $\epsilon = 0$  odgovara relativnoj dubini od 50%; posle provlačenja, pri  $\epsilon = 0,18$  ovom iznosu odgovara dubina od 20%.



S1.11. Promena parametra  $R_a$  sa stepenom stanjenja



S1.12. Promena parametra  $R_t$  sa stepenom stanjenja



S1.13. Raspodela amplituda i kriva nošenja profila

S1.14. Raspodela amplituda i kriva nošenja profila

#### 4. ZAKLJUČAK

Pri modelnim ispitivanjima izvlačenja sa stanjenjem, sprovedenim u radu, realizovan je stacionaran proces, sa "konstantno niskim trenjem", u uslovima visokog kontaktnog pritiska ( $p \leq 2000$  MPa). Najniže vrednosti koeficijenta trenja registrovane su kod korišćenja paste molibden-disulfida kao maziva i fosfatiranih površina lima ( $\mu = 0,02$ ).

Do značajnih promena površinske hrapavosti dolazi već pri stepenu stanjenja od 3%. Pri uvećanju stepena deformacije nema bitnih promena u kvantitetu površine epruvete; izmene treba očekivati pri znatno većem stepenu stanjenja i dužem putu klizanja.

Pokazanim modelom, uz sva ograničenja koja su navedena, može se uspešno simulirati zona kontakta komada i matrice, i izučavati uticaj pojedinih triboloških parametara (mazivo, materijali u kontaktu, površinska hrapavost, specifični pritisak i sl).

#### Reference

- /1/ E.A.Popov, Osnovi teoriji listovoj šampovki, "Mašinstrojenje", Moskva, 1968.
- /2/ H.Đukić, Istraživanje metode proračuna optimalne tehnologije izrade elementa sa redukcijom debljine zida omotača izvlačenjem, Dokt.disert. Mašinski fakultet u Mostaru, 1982.
- /3/ B.Musafia, Nestabilnost procesa izvlačenja, Obrada deformisanjem u mašinstvu, Novi Sad, 1984, Nol/9.
- /4/ K.Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill B.C., New York, 1985.
- /5/ K.Osakada, ... Optimization of working condition in ironing of hollow cylindres, Proc.18th Int.Tool Des. and Res. Conf. London, 1977, 137-144.
- /6/ M.Stefanović, Prilog istraživanju uticaja kontaktnog trenja pri dubokom izvlačenju tankih limova, Dokt.disert.Maš.fak.Kragujevac, 1985.
- /7/ S.J.Vejler, V.I.Lihtman, Dejstviye smazok pri obrototke metalov davlenijem, Akademia nauk SSSR, Moskva, 1960.
- /8/ N.Kawai, ... Assessment of lubricity in the deformation proces by strip-ironing type friction testing machine, Bull.of the JSME, 1/1982, 95-102.
- /9/ D.Schlosser, Beeinflussung der Reibung beim Streifenziehen von austenit. Blech: verschiedene Schmierstoffe und Werkzeuge aus gesinterten Hartstoffen, Bander Bleche Rohre, 7/8-75, 302-306.
- /10/ A.D.Matveev, red.Kovka i šampovka, tom 4, "Mašinstroenije", Moskva, 1987.

M.Stefanović, D.Adamović, M.Mitrović

#### MODELLING TRIBO-CONDITIONS IN IRONING

#### S u m m a r y

Considering in the paper is the complex tribological system arising in ironing. The corresponding model investigation is suggested, and the necessary experimental procedure is carried out. Geometry of the contact pair through the sample is being enables high pressures and thickness reduction levels to be achieved, which, agrees with real situation. The obtained results indicate significant effects of the tribological conditions, i.e. of specific pressure (strain level), and the lubricant used, upon the change in the basic topography of the formed surface, and upon the deformation force.

M.Stefanović, S.Aleksandrović<sup>\*)</sup>

POGODNOST KORIŠĆENJA LIMOVA POVIŠENE ČVRSTOĆE  
PRI DUBOKOM IZVLAČENJU SA ASPEKTA NAKNADNOG  
OJAČANJA STARENJEM

1. UVOD

Pogodnost korišćenja limova povišene čvrstoće (High Strength Steel - HSS) ogleda se u mogućnosti dobijanja karoserije automobila manje mase uz potpuno očuvanje karakteristika otpornosti (krutosti). Pri tome se proizvodi savršeniji i ekonomičniji automobil. U odnosu na klasične niskougljenične limove za duboko izvlačenje ovi limovi imaju nepovoljnije karakteristike obradivosti i višu cenu. Osnovna poteškoća pri izvlačenju limova iz klase HSS je njihova sklonost ka pojavi defekata na površini izvučenog dela (defleksija). Sklonost materijala ka defleksiji može se posmatrati kroz sledeća svojstva /1/:

- sposobnost zadržavanja oblika,
- sposobnost prilagođavanja oblika.

S obzirom da su u prethodnim istraživanjima autora razmatrana svojstva defleksije ovih materijala /2/, dalja izučavanja su tretirala efekte ojačanja jedne grupe HSS limova.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

2.1. Uslovi ispitivanja

Iz širih istraživanja obradivosti limova iz grupe HSS, u radu se izlažu rezultati za materijal koji naknadno ojačava starenjem, tj. moguće je ostvariti tzv. Bake-Hardening efekat. Proces veštačkog starenja se odvija pri temperaturnom režimu koji odgovara uslovima toplog lakiranja automobila (pri pečenju boje postiže se temperatura od 190°C u trajanju od 20', hlađenje je na vazduhu). Lim u procesu izvlačenja ima dobru obradivost, a do izraženog ojačanja dolazi naknadno.

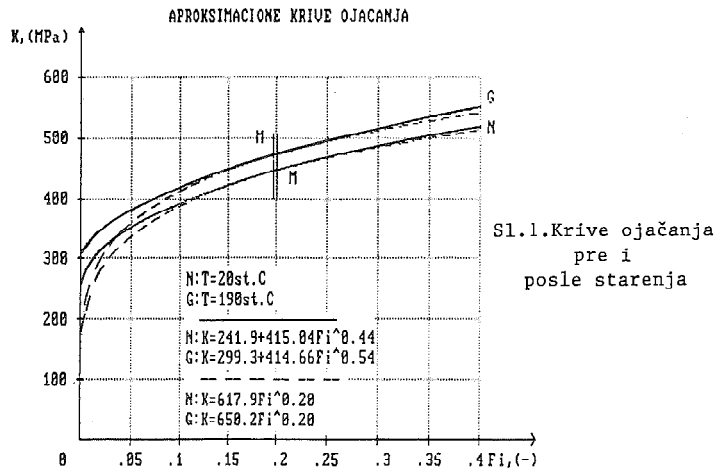
---

<sup>\*)</sup> Dr Milentije Stefanović, dipl.ing., docent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul.S.Janjić 6, Kragujevac  
Srbislav Aleksandrović, dipl.ing. asistent-pripravnik Mašinskog fakulteta u Kragujevcu

Korišćeni lim japanske proizvodnje sa originalnom oznakom CHR 35 BH /3/ spada u grupu refosforisanih čeličnih limova legiranih sa najviše 1% P. Fosfor omogućava formiranje strukture sa čvrstim rastvorom zamene. U tabeli 1 pokazane su karakteristike ispitivanog materijala pre i posle ojačanja (dva oblika eksponencijalnih aproksimacija), za pravac merenja koji se poklapa sa pravcem valjanja.

Karakteristike lima CHR 35 BH Tabela 1

t	s	Rp	Rm	Rp/Rm	A <sub>80</sub>	n
°C	mm	MPa	MPa	-	%	-
20	0,7	241,9	365,8	0,66	28,2	0,191
190	0,7	299,3	387,0	0,77	27,9	0,184



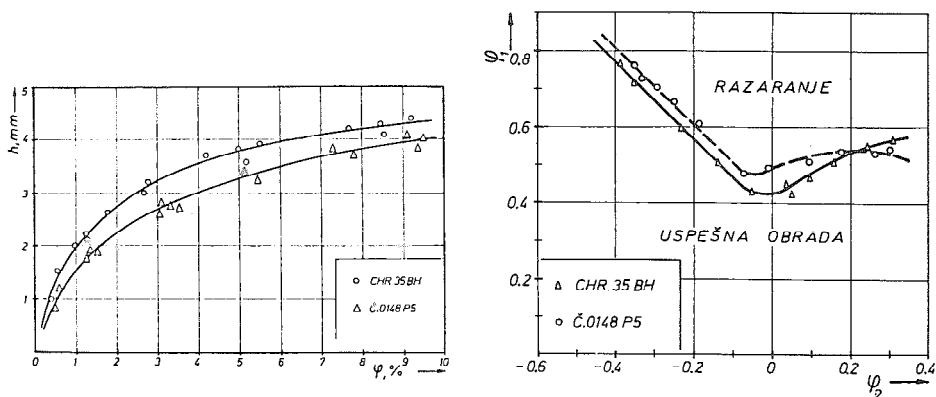
U poređenju sa limom uobičajenih kvaliteta (npr. Č.0148) CHR 35 BH ima uvećane karakteristike otpornosti i iskazuje sklonost ka stvaranju nabora. Na sl.2, pokazani su rezultati tzv. Joshida - "buckling"-testa/4/ prema ranijim ispitivanjima autora /2/. Takođe, registrovane su razlike u obliku i položaju krive razaranja u dijagramu granične deformabilnosti, sl.3.

S obzirom na program istraživanja, u prvom koraku su određivane mehaničke i karakteristike obradivosti, pri različitim temperaturama starenja: 20,60, 100,120,150,170,190 i 210°C; zagrevanje traje 20', a hlađenje je na vazduhu.

Drugi deo ispitivanja obuhvata određivanje deformacionih i naponskih polja, kao i odgovarajuću distribuciju u dijagramu granične deformabilnosti (konstitutivni dijagrami).

Ekperimentalno je realizovana shema dvostranog zatezanja-razvlačenja, vrlo efikasna kod komparativnih analiza različitih uticaja (materijal, mazivo,

brzine, geometrija izvlačača i sl.). Korišćen je polusferni izvlačač prečnika 50 mm; sila držača na obodu onemogućava uvlačenje lima u otvor matrice. Izvlačenja su vršena do dubina  $H_1=15$  mm,  $H_2=20$  mm i  $H_3=H_{\max}$  - do razaranja (R). Na ovaj način je ispitivan lim pre i posle grejanja, kako bi se ocenio stepen ojačanja nakon izvlačenja i posle naknadnog starenja.



Sl.2. Rezultati "buckling"-testa /2/ Sl.3. Dijagrami granične deformabilnosti

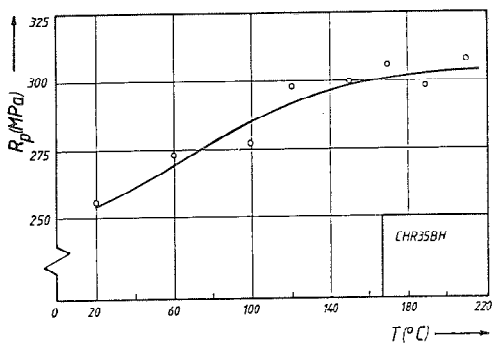
S obzirom na izuzetan značaj triboloških uslova pri shemi razvlačenja, koji može na određeni način biti značajniji od uticaja izmene karakteristika materijala /6/, varirani su i kontaktni uslovi (S-bez maziva, (U+F)-folija polietilena i ulje za dub. izvl.).

Za određivanje deformacija korišćen je poznati postupak vizioplastičnosti - metod mernih mreža, koje su u ovom slučaju nanete elektrohemijski, a sastavljene su od krugova nominalnog prečnika 3 mm. Oznaka lokacije "1" odnosi se na sredinu komada, a "10" na njegovu periferiju. Glavne normalne napone i njihovu raspodelu moguće je odrediti na osnovu izmerenih deformacija uz poštovanje relacija teorije plastičnog tečenja, koje važe za proporcionalno naprezanje /5/. Pri tome se, zbog prirode geometrijskih metoda merenja ne mogu registrovati strukturne promene, do kojih dolazi pri starenju.

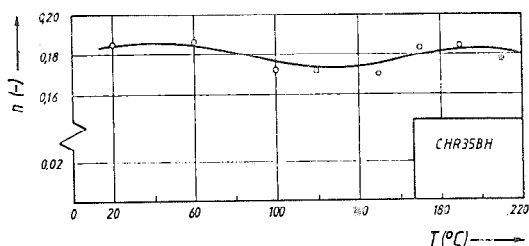
Sva ispitivanja su vršena na specijalnoj hidrauličnoj presi ERICHSEN 142/12, opremljenoj sistemima za merenje i delimičnu akviziciju. Brzina deformisanja iznosi 20 mm/min.

## 2.2. Eksperimentalni rezultati

Zavisnost granice tečenja  $R_p$  (srednja vrednost) i "n-faktora" od temperature zagrevanja pokazana je na sl.4. i sl.5. Promena veličine  $R_p$  je izrazita, dok se "n-faktor", zatezna čvrstoća i izduženje pri prekidu ne menjaju značajno (nisu dati prikazi za  $R_m$  i  $A_{80}$ ).

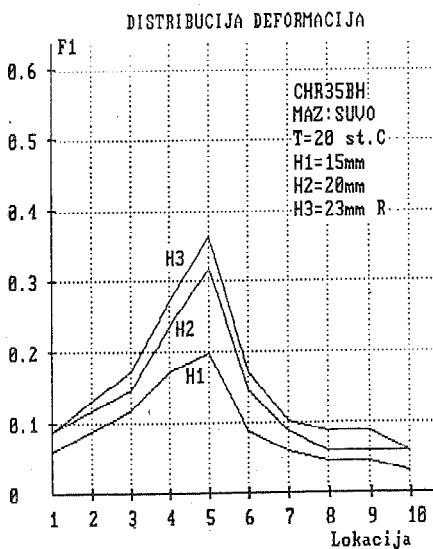


Sl.4. Zavisnost granice tečenja od temperature

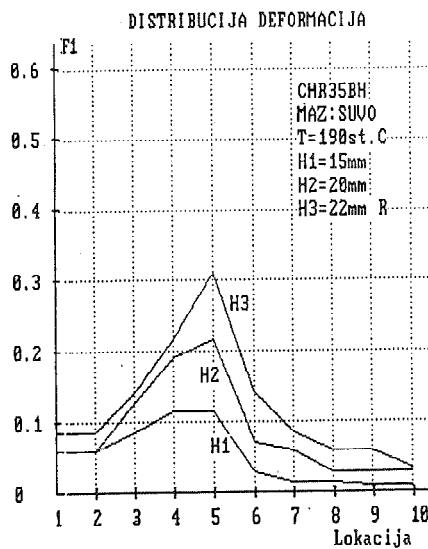


Sl.5. Zavisnost "n-faktora" od temperature

Distribucije glavne meridionalne deformacije (F1) za različite temperature i kontaktne uslove prikazana su na sl.6,7,8,9.

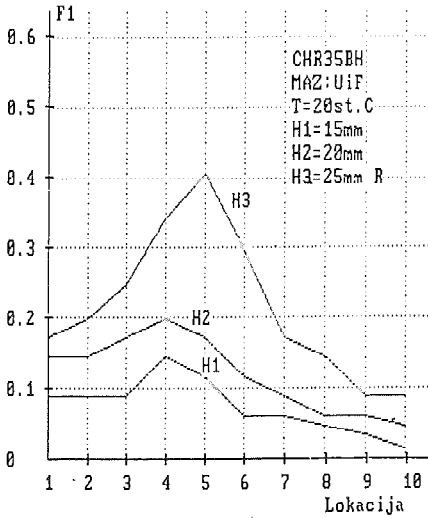


Sl.6. Distribucija glavne deformacije (t=20°C)

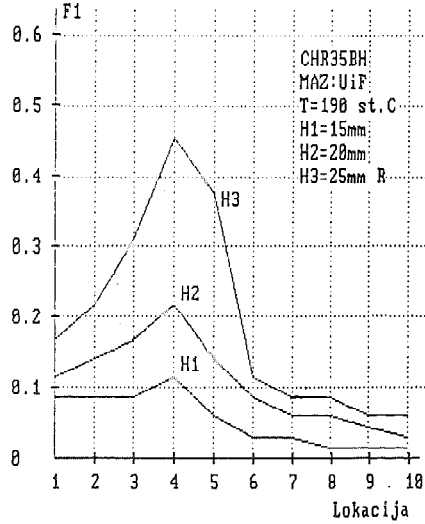


Sl.7. Distribucija glavne deformacije (t=190°C)

DISTRIBUCIJA DEFORMACIJA

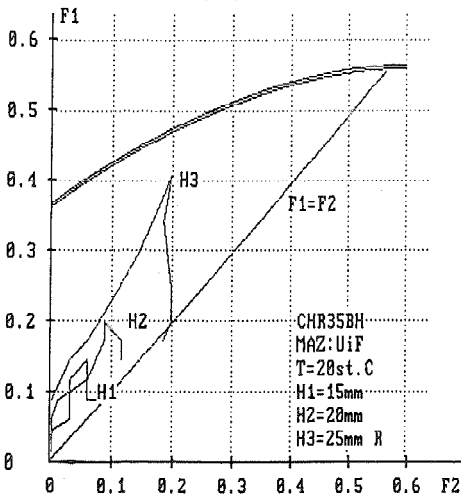
Sl.8.Distribucija glavne deformacije  
( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

DISTRIBUCIJA DEFORMACIJA

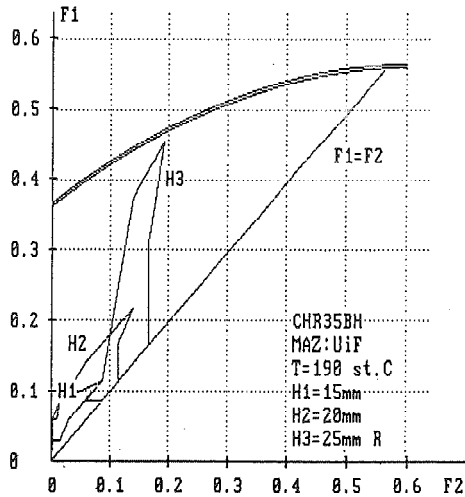
Sl.9.Distribucija glavne deformacije  
( $t=190^{\circ}\text{C}$ )

Uticaj kontaktnih uslova je vrlo izražen i ne menja se značajno zagrevanjem. S obzirom na relativno male promene pokazatelja izduženja, i razlike u distribucijama deformacija su relativno male. Uključivanjem druge glavne deformacije (F2), moguće je konstatovati ravnomernije deformisanja u slučaju negrejanog materijala, sl.10. i sl.11.

KONSTITUTIVNI DIJAGRAM

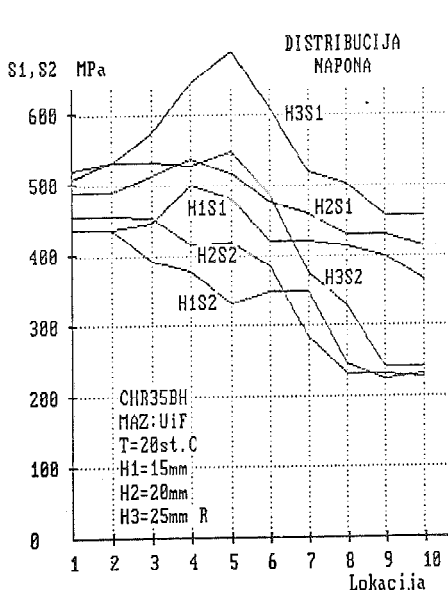
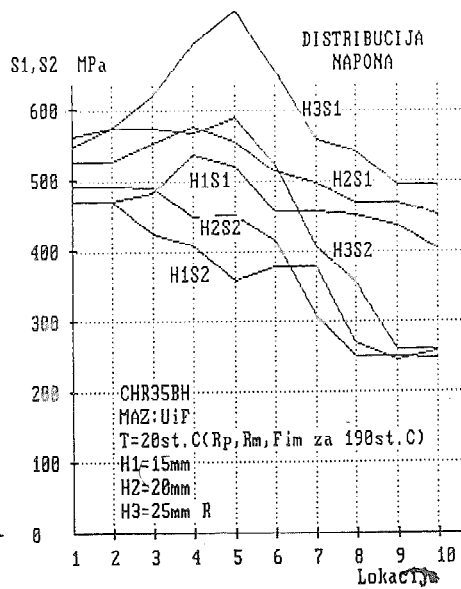
Sl.10.Raspodela deformacija u DGD  
( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

KONSTITUTIVNI DIJAGRAM

Sl.11.Raspodela deformacija u DGD  
( $t=190^{\circ}\text{C}$ )



Na osnovu pokazanih distribucija deformacija i krivih tečenja mogu se odrediti vrednosti glavnih normalnih napona (meridionalni - S1 i tangencijalni - S2) za više faza izvlačenja, sl.12. Na drugi način, koristeći realizovana deformaciona polja epruveta od negrejanog materijala i krive tečenja materijala koji je bio podvrgnut starenju, analitički se može doći do naponskih polja ojačanog materijala, sl.13. Promene u raspodelama napona su direktna posledica izmene granice tečenja, odnosno krive ojačanja.

S1.12. Raspodela napona za  $t=20^{\circ}\text{C}$ S1.13. Raspodela napona za  $t=190^{\circ}\text{C}$ 

### 3. ZAKLJUČAK

Prema metodologiji sprovedenoj u ovom radu, do ocene pogodnosti lima iz klase HSS - BH za duboko izvlačenje može se doći na osnovu kvantitativnih pokazatelja distribucije napona određenoj preko deformacionih polja za materijal koji nije bio podvrgnut starenju; pri ovome se koristi kriva ojačanja grejanog materijala.

Izvlačenjem lima koji je ostario pokazano je da pad karakteristika obradivosti (prvenstveno porast odnosa  $R_p/R_m$ ) ne utiče bitno na svojstva plastičnosti. Razmatranja važe za oblast razvlačenja; čisto duboko izvlačenje i promena "r-faktora" nisu istraživani.

Uticaj tribo-uslova (vrsta maziva u ovom slučaju) je vrlo izražen i nadmašuje uticaj veštačkog starenja u zonama u kojima se deformisanje uopšte ostvaruje, za razliku od ojačanja starenjem, koje generalno diže krivu tečenja.

## Reference

- /1/ B.Devedžić, Okolnosti koje otežavaju šire korišćenje karoserijskih limova velike čvrstoće i upućuju na nova tehnološka rešenja, 19.SPMJ, Kragujevac, 1985, 142-150.
- /2/ M.Stefanović, S.Aleksandrović, Neki aspekti korišćenja limova povišene čvrstoće za duboko izvlačenje, 21.SPMJ, Opatija, 1987, 41-47.
- /3/ Katalog-Kawasaki, Cold rolled high strength steel, KSCo, 1985.
- /4/ Segala A., Pearce R., A study on compressive instability using the Yoshida -test, Proc. 14th Biennial IDDRG Congress, Köln, 1986, 476-477.
- /5/ A.D.Tomlenov, Teorija plastičeskogo deformirovania metalov. "Metalurgija", Moskva, 1972.
- /6/ M.Stefanović, Geometrija i kontaktno trenje kao uticajni parametri na graničnu deformabilnost tankih limova pri razvlačenju, BIAM 1982, Zagreb, B/105-F/108.

M.Stefanović, S.Aleksandrović

SUITABILITY OF HIGH-STRENGTH SHEET METAL FOR DEEP  
DRAWING FROM THE STANDPOINT OF FURTHER HARDENING BY AGING

S u m m a r y

Presented in the paper are the results of tests made with high-strength steel in the conditions of realization of a very intensive aging accompanied by hardening, thus simulating the final phase of car body painting (paint baking in accordance with a prescribed thermal regime). In addition to the standard formability characteristics ( $R_p$ ,  $R_m$ ,  $A_{80}$ , "n-factor"), the hardening intensity was also investigated by determining stress-strain fields in biaxial stretching in different experimental conditions: temperature, depth of draw, contact states, etc.



V. Krušič\*

ANALIZA PROCESA ISTOSMERNEGA IZTISKAVANJA  
PASTORKA V POGOJIH REDNE PROIZVODNJE

1. UVOD

Pastorek je eden najbolj obremenjenih delov avtomobilskega zaganjalnika. Ob vsakem vklopu zaganjalnika prenašajo zobje pastorka velike dinamične obreme - nitve. Izdelava zob pastorka s postopkom istosmernega iztiskavanja je način, ki nam zagotavlja doseganje predpisanih trdnostnih in mehanskih parametrov na eni strani ter ceneno proizvodnjo pastorka na drugi strani. V tem prispevku je prikazan tehnološki postopek izdelave pastorka. Jedro je skoncentrirano na postopku istosmernega iztiskavanja zob pastorka. Za to operacijo je podan izračun preoblikovalnih parametrov ter obremenitve vitalnih delov orodja. V redni proizvodnji je med procesom istosmernega iztiskavanja posnet diagram preoblikovalne sile v odvisnosti od časa. V nadaljevanju je govora o izboljšanju življenjske dobe vitalnih delov orodja ter o mehanskih lastnostih pastorka.

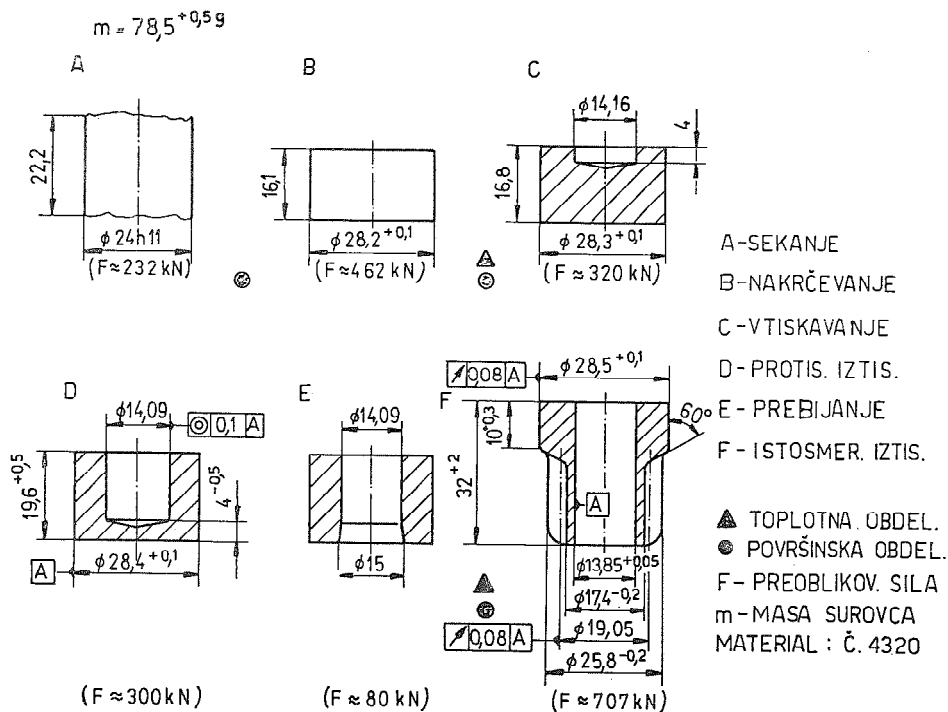
2. STADIJSKI PLAN IZDELAVE PASTORKA

Za kvalitetno izdelavo pastorka je potrebno določeno število operacij, ki si sledijo v logičnem zaporedju.

Za doseganje zahtevanih geometrijskih lastnosti pastorka je potrebno, da so dimenzije na predhodnih fazah v tolerančnem območju. Na stadijskem planu so navedene približne vrednosti preoblikovalnih sil za posamezne operacije, ki se izvajajo na stiskalnici KOMATSU MAYPRES imenske sile 3200 KN.

---

\*/ Vid Krušič, dipl.ing., vodja konstrukcije orodij za hladno preoblikovanje v projektivnem biroju tozda - Tovarne delovnih sredstev ISKRE Avtoelektrike Nova Gorica, Vrtojbenska 62, 65290 Šempeter pri Novi Gorici

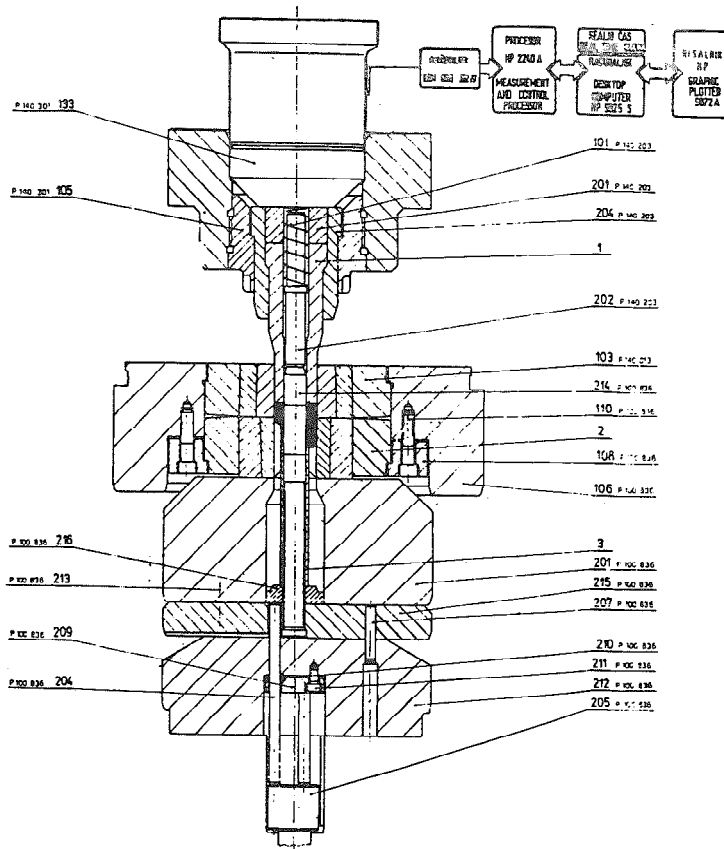


Slika 1. Stadijski plan izdelave pastorka

### 3. OPERACIJA ISTOSMERNEGA IZTISKAVANJA ZOB PASTORKA

#### 3.1 ANALIZA POSTOPKA

Za izdelavo zob pastorka uporabimo postopek istosmerneza iztiskavanja votlih teles. Na sliki 2 je prikazan sklop orodja, ki se sestoji iz horizontalno deljive matrice - poz. lo3, 2, pestiča poz. 1, pozicionirnega trna poz. 214 ter izmetalne puše poz. 3 in ostalih elementov. Vodilni trn pozicionira predhodni preoblikovanec, pestič pa ga potisne v matrico, kjer pride do istosmerneza iztiskavanja zob. Po končanem delovnem gibu sledi izmetavanje izdelka iz matrice z izmetalno pušo.



Slika 2. Sklop orodja za istosmerno iztiskavanje. Nad pestičem je vgrajena merilna doza za hitro registracijo preoblikovalne sile.

### 3.2 IZRAČUN PREOBLIKOVALNE SILE TER DELA

Preoblikovalna sila /1/

$$F_p = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \rho_g \left( 1 + \frac{2 \cdot \mu}{\sin 2\alpha} + \frac{1 \cdot \sigma}{2 \cdot \rho_g} \right) + d_T \cdot \mu \cdot \pi \cdot l \cdot d_0$$

$$F_p = \frac{\pi}{4} (28,6^2 - 13,85^2) \cdot 610 \cdot 1,3 \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,1}{\sin 120^\circ} + \frac{1 \cdot \pi}{3 \cdot 2 \cdot 1,3} \right) + 400 \cdot 0,1 \cdot \pi \cdot$$

$$19,6 \cdot 28,6 = 707,5 \text{ KN}$$

Glavna logaritmična deformacija

$$\rho_g = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_1^2 - d_2^2} = \ln \frac{28,6^2 - 13,85^2}{19,05^2 - 13,85^2} = 1,3$$

Medialna vrednost preoblikovalne trdnosti

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} = \frac{400 + 820}{2} = 610 \text{ N/mm}^2$$

$k_{f1}$  - določim iz diagrama krivulje plastičnosti (sl.3)

$$k_{f0} \approx \delta_T = 400 \text{ N/mm}^2$$

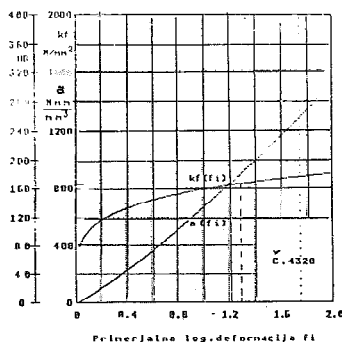
Pri izračunu preoblikovalne sile sem uporabil koeficient trenja

$\mu = 0,1/1$ , za  $d_1 = 19,05 \text{ mm}$  sem izbral premer delilnega kroga zoba pastorka.

Preoblikovalno delo

$$W_p = F_p \cdot (h_0 - h_k) \cdot \lambda = 707,5 (19,6 - 10) \cdot 1 = 6,8 \text{ KJ}$$

$\lambda = 1 \dots$  Koeficient, ki izraža odnos med srednjo in maksimalno preoblikovalno silo.



Oznaka materiala: Č. 4320  
 Dobavitelj: IGIRSA Nova Gorica  
 Številka vzorca: 23AA0 - 203  
 Začetne dimenzije:  $D_0 = 80 \text{ mm}$ ,  $H_0 = 10 \text{ mm}$   
 Način toplotne obdelave: Term. zdr. 700 °C  
 Številka profil. usancev: 3  
 Meja tečenja: 0,25007181 N/mm²  
 Vrsta materiala: Fe1100  
 Koeficient trenja: 0,1  
 Maksimalna deformacija: 1,25007181

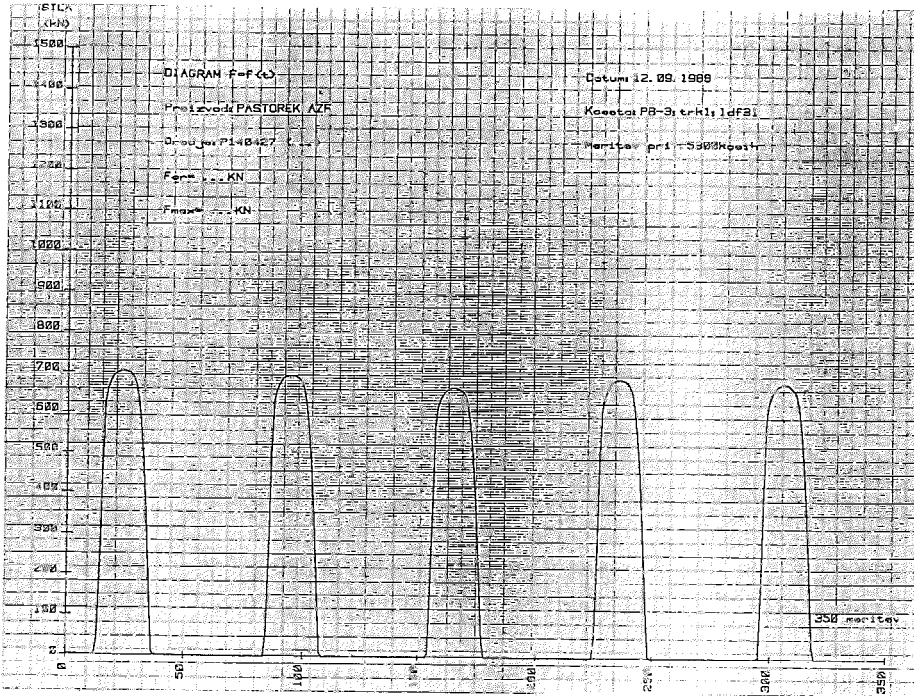
Krivulja plastičnosti:  
 Konstanta materiala:  $C = 790,66978 \text{ N/mm}^2$   
 Eksponent utrjevanja:  $n = 0,19891354$   
 Koeficient korekcije:  $m = 0,99200000$

Slika 3: Diagram krivulje plastičnosti za Č. 4320 /2/

### 3.3 DIAGRAM SILE V ODVISNOSTI OD ČASA ( $F = f(t)$ )

Diagram (slika 4.) je rezultat merilnega sklopa oziroma mikroprocesorja, katerim v ISKRI Avtoelektriki registriramo preoblikovalne sile med -om hladnega preoblikovanja v redni proizvodnji /3/. Iz diagrama

je razvidno nihanje ekstremov sil istosmernega iztiskavanja zob pastorka, ki je posledica nihanja v teži vhodnih surovcev. Vrednost izmerjene sile se dobro ujema z vrednostjo izračunane preoblikovalne sile.



Slika 4. Diagram  $F = f(t)$  za istosm. iztiskav. zob pastorka

#### 3.4 OBREMENITEV ORODJA

Pestič ter matrica sta obremenjena s specifičnim pritiskom, ki deluje na kontaktne površine.

Pritisk na pestič

$$p_p = \frac{F}{A_p} = \frac{707,5 \cdot 10^3 \cdot 4}{\pi \cdot (28,6^2 - 13,86^2)} = 1438,7 \text{ N/mm}^2$$

Iztiskovalni pritisk, ki deluje na kontaktne površine matrice

$$p_i = p_p (0,8 \div 0,9) = 1438,7 \cdot 0,9 = 1295 \text{ N/mm}^2$$

To so srednje izračunane vrednosti za  $p_p$  in  $p_i$ . Iz prakse in teorije je

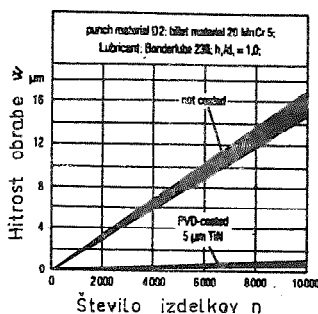


poznano, da so lokalne vrednosti iztiskovalnega pritiska vzdolž preoblikovalne cone precej večje. Zato moramo pri izbiri orodnega jekla zagotoviti, da ima tlačna meja tečenjsko določeno rezervno napram izračunani vrednosti. V našem primeru je matrica prednapeta. Z aksialnim prednapetjem se izognemo prečnim razpokam, ki bi se pojavile na prehodu iz cilindričnega dela v deformacijsko cono matrice. Horizontalno deljiva matrica z vložkom iz jekla ASP 30 je aksialno prednapeta s specifičnim pritiskom vrednosti cca  $800 \text{ N/mm}^2$ . Nihanje velikosti iztiskovalnega pritiska vzdolž preoblikovalne cone povzroča razliko v dihanju - radialnem raztezanju vložkov horizontalno deljive matrice. Problem rešimo z ustreznim zmanjšanjem premera gornjega vložka.

### 3.8 IZBOLJŠANJE ŽIVLJENSKE DOBE VITALNIH DELOV ORODJA

Na življensko dobo orodja vpliva poleg optimalne konstrukcije orodja, kvalitetnih orodnih materialov, vrste izdelave ter termične obdelave tudi prekritje kontaktnih površin orodja s TIN (titanov nitrid) prevleko. Za oplaščenje orodij za hladno preoblikovanje uporabljamo TIN prevleke, ki se nanašajo po metodi fizikalnega parnega nanašanja (PVD) pri zmernih temperaturah pod  $550^\circ\text{C}$  torej pod temperaturo popuščanja. S TIN prekrivamo v ISKRI Avtoelektriki vse pestiče in matrice, ki so podvrženi veliki obrabi delovnih površin. Na ta način dosežemo podaljšanje življenske dobe orodij za 3 do 10 krat (slika 4). Toda na delovnih površinah z majhnimi in dolgimi utori, kot je naprimer matrica za pastorek, prihaja do luščenja prevleke TIN na mestih glavičnega in vznožnega utora. Problem je rešljiv s kvalitetnejšim poliranjem, ki je v območju glavičnega utora otežkočeno ali z nanosom prevleke po metodi kemičnega parnega nanašanja (CVD) /4/.

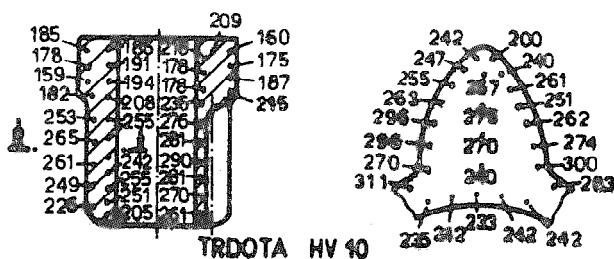
Življenska doba matric za iztiskavanje pastorkov se giblje v okviru 40 - 100.000 kosov. Velike razlike v življenski dobi matric so tisti velik še vedno nerešen problem pri hladnem preoblikovanju. Ta problem bi bilo potrebno čimprej obdelati, predvsem v skupnem sodelovanju z univerzo.



Slika 5. Vpliv TIN prevleke na obrabo pestiča pri iztiskavanju lonca /4/

#### 4. MEHANSKE LASTNOSTI PASTORKA

Porazdelitev trdote po preseku pastorka je prikazana na sliki 6. Slika prikazuje porazdelitev trdote po vzdolžnem prerezu ter prečnem prerezu preko zoba pastorka. Največja utrditev materiala oziroma vrednost preko 310 HV 10 trdote se pojavi pri prečnem preseku zoba ob prehodu iz vzožnega kroga v profil zoba. Pri vzdolžnem preseku pa je največja trdota na veznem delu med notranjo luknjo in vzožnim krogom in doseže vrednost 290 HV 10.



Slika 6. Porazdelitev trdote po vzdolžnem in prečnem preseku zoba

#### 5. ZAKLJUČEK

V prispevku smo na kratko podali analizo istosmernega iztiskavanja pastorka. Velikost preoblikovalne sile pastorka, izmerjena med procesom iztiskavanja v redni proizvodnji, nam da v vsakem trenutku sliko o sta-

nju in konstantnosti vhodnih parametrov, ki vstopajo v proces. Zavedamo se, da nam merilni sklop omogoča nadzor procesa v proizvodnji le na eni stiskalnici. Zato je pred nami naloga v zagotovitvi nadzora nad procesi na vseh šestih stiskalnicah, ki so vključene v proizvodnjo na liniji hladnega preoblikovanja.

#### Reference

- /1/ Gaiger R., Woska R.: Fließpressen, Carl Hanser Verlag München Wien, 1984
- /2/ Kuzman K.: Ocena preoblikovalnih sposobnosti jekel za hladno masivno preoblikovanje, Poročilo k svetovalni nalogi: Hladno kovanje, FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO, Ljubljana, 1988
- /3/ Kodrič I.: Vrednotenje masovne proizvodnje hladno kovanih delov z mikroprocesorjem, Strojniški vestnik Ljubljana 1981 / 4 - 6.
- /4/ Geiger R.: State of the Art and Development Trends in Cold Forging Technology. Advanced Technology of Plasticity, Stuttgart 1987.

V. Krušič

#### ANALYSIS OF THE PROCESS OF FORWARD EXTRUSION OF A PINION IN CONDITIONS OF REGULAR PRODUCTION

#### S u m m a r y

The technology of automotive starter pinion manufacture is dealt with in this article. The core section gives a concise account of the forward extrusion of the pinion teeth. The forming force, the load applied to the vital parts of tools and the tools service life calculations are presented. The forming forces is measured by measuring instrument or by a microprocessor on cold forming line on a press KOMATSU MAYPRES the nominal force of which is 3200 KN.

In such a way ISKRA AVTOELEKTRIKA has already manufactured millions of automotive starter pinions.

M. Math

PRIMJENA JEDNE INKREMENTALNE ANALITIČKE  
METODE PRI KOVANJU AKSIJALNO SIMETRIČNOG  
TIJELA

1. UVOD

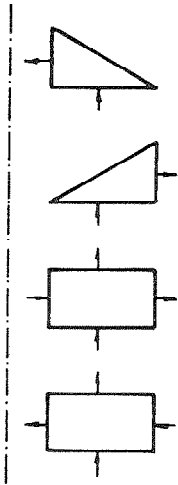
Uobičajeno je da se proces tečenja materijala prilikom postupka kovanja u ukovnjima istražuje služeći se empirijskim metodama ili onim koje u osnovi koriste Siebel-ovu tehniku analize naprezanja elementarnog volumena. Pri tome se često puta poduzima niz pokusa sa ciljem ustanovljavanja u kojoj se mjeri popunjavanju šupljine u gravuri kod čega se istovremeno formira vijenac od viška materijala kakav kod ovakovog načina kovanja uvijek postoji. Na taj se način postupak kovanja sastoji od praktički tri faze: početne faze, uvjetno rečeno slobodnog tečenja materijala koja traje dok se gravura ne počinje zatvarati, preoblikovanja i popunjavanja šupljina u gravuri, te potpunog popunjavanja gravure koje je ujedno povezano sa formiranjem vijenca gdje kanal za vijenac pretstavlja mjesta povećanog otpora tečenju, pa time i osigurava da gravura bude u potpunosti ispunjena materijalom. To je i razlog što u ovoj zadnjoj fazi sila potrebna za odvijanje procesa tečenja materijala naglo raste.

Kovačka je industrija tradicionalno vezana uz spomenute empirijske i poluempirijske metode, čija je osnovna prednost brzina i jednostavnost koji su nužna pretpostavka rješavanja tekućih problema proizvodnje. Kako je međjutim riječ o metodama koje koriste znatno pojednostavljeni matematički aparat te

---

mr. Miljenko Math, dipl. ing., znanstveni asistent Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, ul. Djure Salaja 5

niz uvedenih aproksimacija, rezultati koje nude su u nekim slučajevima samo gruba približna rješenja. To je i razlog što se



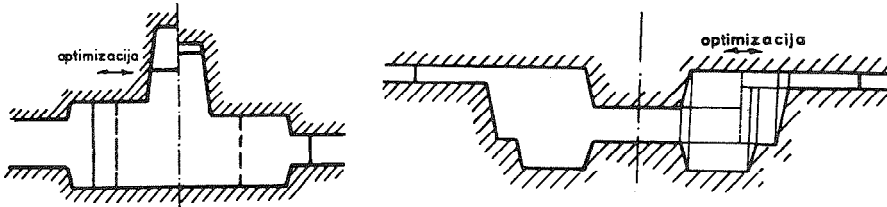
u kovačkoj industriji često puta koristi iskustvo pri donošenju odluke o tome da li se određeni otkovak može zaista proizvesti na željeni način, a do konačne konstrukcije alata se isto tako često puta dolazi poduzimanjem niza eksperimenata. Savremene metode temeljene na teoriji obrade metala deformiranjem, poput metode linija klizanja, metode konačnih elemenata te metode analize ekstrema počinju se međjutim sve više upotrebljavati. Kod toga ove metode koriste znatno složeniji matematički aparat i u obzir uzimaju znatno veći broj utjecajnih veličina. Pristupi ovih metoda su na taj način egzaktniji i rješenja daju veću točnost, no istovremeno su

sl. 1

i značajno kompliciranije. Postoje već mnoge matematičke analize uz uvođenje velikih računara /2,3/ kao i radovi koji govore o simulaciji procesa tečenja /4,5/. Iako ovako dobivena rješenja pokazuju veliku pouzdanost sa rezultatima eksperimenata, složenost matematičkog aparata postaje sve veća, a cijena upotrebe računara proporcionalno raste.

## 2. RAZRADA PROBLEMA

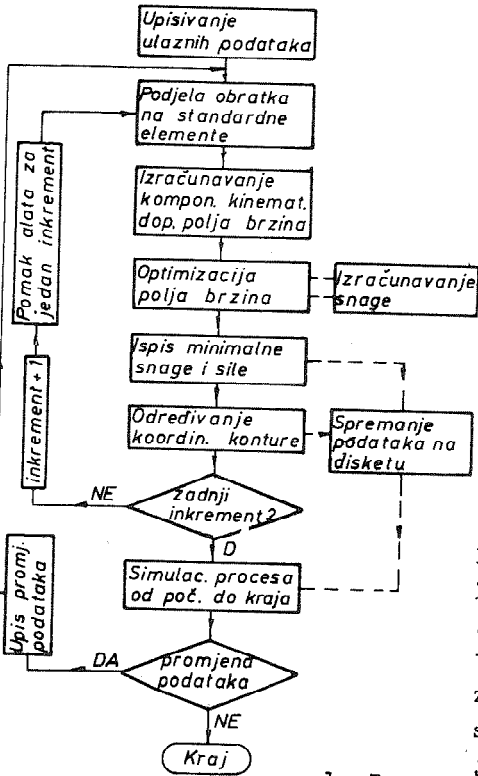
U ovom je radu korištena pojednostavljena metoda proizašla iz metode gornje granice uvedene od strane H. Kudo-a /6/. Metoda gornje granice se redovito upotrebljava za predviđanje gornjih mogućih vrijednosti sila i energija kovanja. U primjeni ove aproksimativne metode smatra se da je snaga koja se troši prilikom procesa plastičnog tečenja manja ili jednaka sumi unutarnje snage plastične deformacije i snage koja se troši na mjestima diskontinuiteta brzina te vanjsko trošje. Ove se snage računaju na osnovu tzv. kinematski dopuštenog polja brzina kao:



sl. 2

$$P_e \leq P_g = \int_V \dot{\epsilon} dV + \int_S \mu \dot{s} dS$$

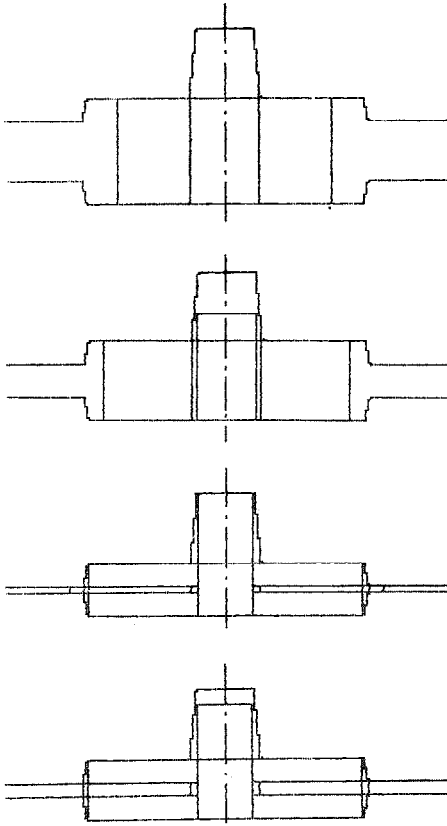
Uobičajeni postupak u primjeni metode gornje granice je u pro-



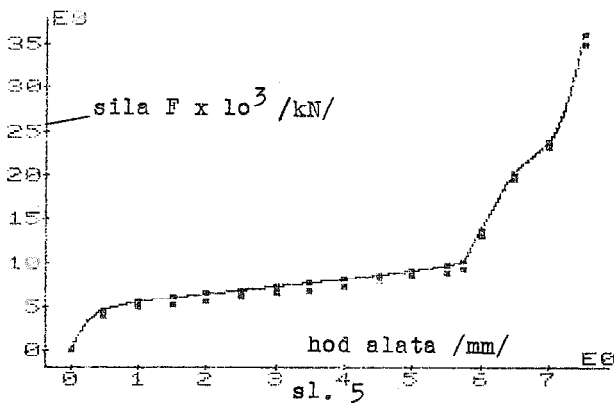
sl. 3

je daje najnižu vrijednost smatra se najboljim rješenjem. Matematičko opisivanje polja provodi se uvođenjem varijabli koje utječu na variranje polja brzina. Ovakav se postupak susreo sa problemom da u slučajevima velikog plastičnog tečenja, a redovito su procesi plastičnih deformacija takovi, jednom ustanovljeno polje brzina koje daje najnižu vrijednost gornje granice te je time optimalno, nije stalno već se mijenja i neprestano treba tražiti novo polje koje daje minimalnu vrijednost gornje granice i optimalno rješenja. S tim u vezi Kudo je došao na ideju da se obradak podijeli na određeni broj standardnih geometrijskih elemenata unutar kojih

se podrazumijeva kinematski dopušteno polje brzina. Umjesto dobivanja jedinstvenog polja brzina razmatra se skup standardnih elemenata koji su odvojeni površinama diskontinuiteta, a optimiranje polja brzina tj. traženje minimuma ukupne snage deformacije provodi se obzirom na komponente brzina okomite na ove granice. Ova je metoda nedavnim radovima na koje se i ovaj navodovezuje, razvijena upravo u cilju rješavanja zahtjeva kovačke industrije za pouzdanom metodom predviđanja sila i energija kovanja te načina tečenja materijala u slučaju kovanja u ukovnjima. U ovom su radu upotrebljeni aksijalno simetrični elementi trokutnog i pravokutnog presjeka /sl. 1/, a sa strelicama su označeni mogući pravci tečenja materijala. Svaki se element



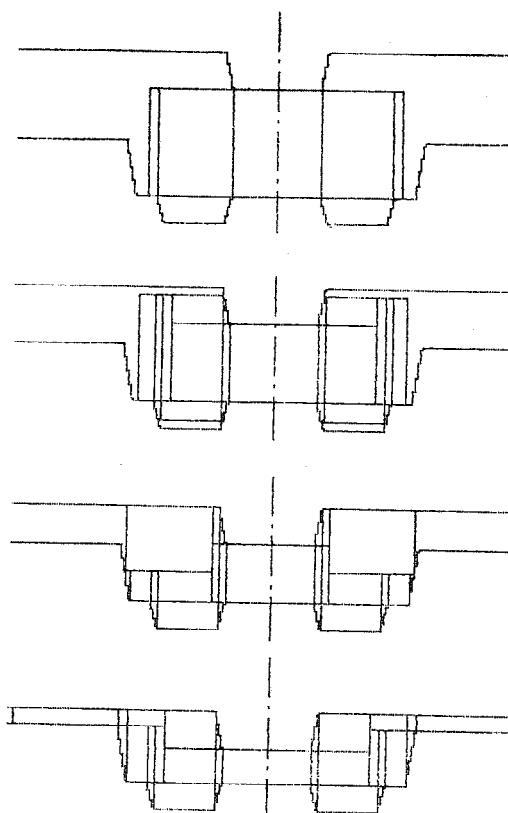
sl. 4



sl. 5

tretira nezavisno primjenom paralelnog polja brzina gdje je pretpostavljeno da je brzina deformiranja nezavisna od vertikalne koordinate. Površine diskontinuiteta leže na granicama elemenata, a materijal teče u smjeru koji zahtijeva najmanju snagu. U radu su promatrane dva tipa ukovanja /sl. 2/, a ujedno je označeno i kako se provodio postupak optimizacije tj. položaj i raspodjela na elemente kod kojih je vrijednost snage deformiranja minimalna. Kao pokusni materijal korišteno je olovo Pb 99,99 % za koje je općenito ustanovljeno da ne pokazuje značajne razlike u pogledu tečenja u odnosu na čelik zagrijanog na temperaturu kovanja. Za ovaj je materijal pokusima

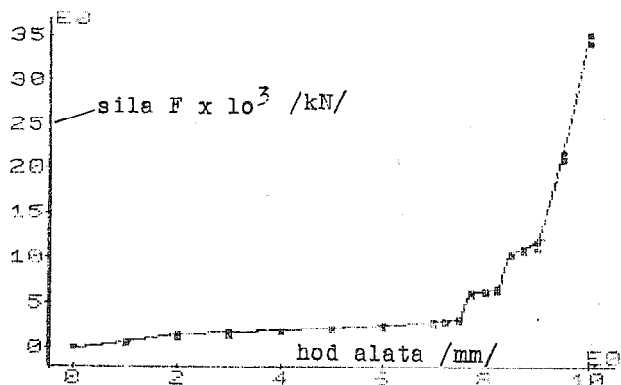
ustanovljena i regresijskom analizom određena zavisnost naprezanja plastičnog tečenja pri sobnoj temperaturi na kojoj su pokusi i obavljani. Početne dimenzije sirovca zajedno sa koordinatama ukovanja zadani su kao ulazni podaci, pri čemu se tokom te-



sl. 6

tečenja smatra da obradek može poprimiti bilo koji oblik sa ravnim konturama, što odgovara korištenom tzv. paralelnom polju brzina. Program čiji je dijagram tijekom prikazan na sl. 3 omogućavao je da naprezanje plastičnog tečenja bude zadano kao funkcija stupnja deformacije i mogao je obzirom na to imati različite vrijednosti u unutrašnjosti obratka i u području vijenca. Podjela na standardne elemente učinjena je za svaki slučaj posebno, tako da se svaka faza kovanja mogla inkrementalno promatrati. Brzina na slobodnim površinama definira smjer i veličinu tečenja. Za odabrani inkrement vremena ta brzina predstavlja kinematski dopušteno polje pomaka i ona

je za taj inkrement stalna tj. nepromijenjena. Koordinate konture su onda ulazni podaci za slijedeći inkrement, pri čemu su one uvijek povezane ravnim linijama. Pojedine faze tečenja prikazane su na sl. 4 i sl. 6, a pripadajući dijagrami zavisnosti sila i hoda alata na sl. 5 i sl. 7.



sl. 7



Krivulje se odnose na proračunate vrijednosti, a diskretne vrijednosti dobivene eksperimentom predočene su punim kvadratima. U postupku je korišteno mikroračunalo Apple IIe i štampač Epson FX 80, sa relativno skromnom grafičkom rezolucijom kao i svim nedostacima štampača u odnosu na ploter, što i objašnjava izgled pojedinih faza procesa odnosno izgled prezentiranih dijagrama.

### 3. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U promatranju procesa plastičnog tečenja vrlo se često javlja potreba za predviđanjem potrebnih sila odnosno energija deformiranja, a jednako tako i tečenja materijala, no za sada ne postoji metoda koja bi istovremeno bila pouzdana i jednostavna za primjenu. U radu je prikazana mogućnost korištenja jedne aproksimativne metode koja se temelji na teoremu gornje granice /upper bound/ upotrebom standardiziranih geometrijskih elemenata /upper bound elemental technique/. Ovim je postupkom moguće simuliranje procesa tečenja kao i predviđanje za to potrebne sile. Uočava se da je optimizirano polje brzina dovoljno blisko stvarnom i da se može koristiti za proračunavanje sile i predviđanje tečenja materijala. U usporedbi sa uobičajenim metodama koje ne koriste računarsku tehniku analize metoda daje:

- ispravno predviđanje sile i načina tečenja i kod složenih oblika ukovanja
- brže rezultate: u slučaju prvog ukovnja vrijeme trajanja proračuna je cca 1,5 sati, a u drugom cca 2 sata
- u usporedbi sa postojećim metodama i programima koji koriste UBET metodu, program je jednostavniji i jeftiniji za primjenu, pogotovo ako korisnik nije vičan metodi gornje granice. Rad ujedno prikazuje da je ovu metodu moguće koristiti i uz upotrebu računala relativno skromnih mogućnosti
- predložena inkrementalna tehnika koristi četiri standardizirana elementa, za koje su prethodno određene brzine na granicama i koje pretstavljaju mjesta diskontinuiteta. Inkrementalnom minimizacijom omogućeno je dobivanje trenutnog geometrijskog oblika obratka te trenutna sila ili energija deformiranja

## Reference

- 1/ Altan T., Fiorentino R.J.: Predictions of loads and stresses in closed die forging, J. of Eng. for Industry, May 1971
- 2/ Cramphorn G., Bramley A.N.: Computer aided forging design with UBET, Proc. 18th M.T.D.R., 1977
- 3/ Subramanian T., Altan T.: Application of interactive graphics in CAD/CAM, Conf. of Comp. in CAD/CAM Systems, 1979
- 4/ Thornton J.T., Bramley A.N.: An approximate method for prediction of metal flow in forging and extrusion operations, Proc. Inst. Mech. Eng., 1980
- 5/ Mc. Dermott R.P., Bramley A.N.: An elemental upper bound technique for general use in forging analysis, 15 MTDR Conf, 1974
- 6/ Kudo H.: An upper bound approach to plain strain forging and extrusion I-II, Int. J. Mech. Sci., 1960
- 7/ Avitzur B.: The application of limit analysis, Metal Forming, 1977
- 8/ Altan T.: Computer simulation to predict load, stress and metal flow in an axisymmetric closed die forging, Battelle Memorial Institute 1979
- 9/ Math M.: Primjene jedne varijante metode gornje granice u procesu kovanja aksijalno simetričnog tijela, Int. Symp. on CAD/CAM, 1987

Math M.

THE APPLICATION OF AN INCREMENTAL ANALYTICAL  
METHOD IN THE PROCESS OF AXISYMMETRIC  
FORGING

S u m m a r y

In this paper it is presented a technique for the prediction of load and a way of metal flow in an axisymmetric forging process. The method is based on the upper bound elemental technique and simulates the process in an incremental manner. Details of results obtained for two different closed die forging are given.



V. Mitković \*

PRIOLOG ODREĐJIVANJU PREDZNAKA IZVODA  
POMERANJA PO KOORDINATI DOBIJENIH ME-  
TODOM MOAR

Odredjivanje polja deformacija u procesima plastične deformacije moguće je vršiti, pored ostalih, metodom moara.

Dobijena eksperimentalnim putem, slika moare linija, predstavlja sistem linija jednakih pomjeranja u odredjenom pravcu.

Pošto je po definiciji, deformacija u prvom približenju jednaka izvodu pomjeranja prema odgovarajućoj koordinati, polje deformacija se iz slike linija moara može dobiti kao tangens ugla tangente povučene na funkciju pomjeranja u odredjenoj tački.

Funkcija pomjeranja može se iz linija moara dobiti ako se iste shvate kao linije jednakog nivoa (izohipse) površine pomjeranja koja se nalazi iznad fizičke ravni.

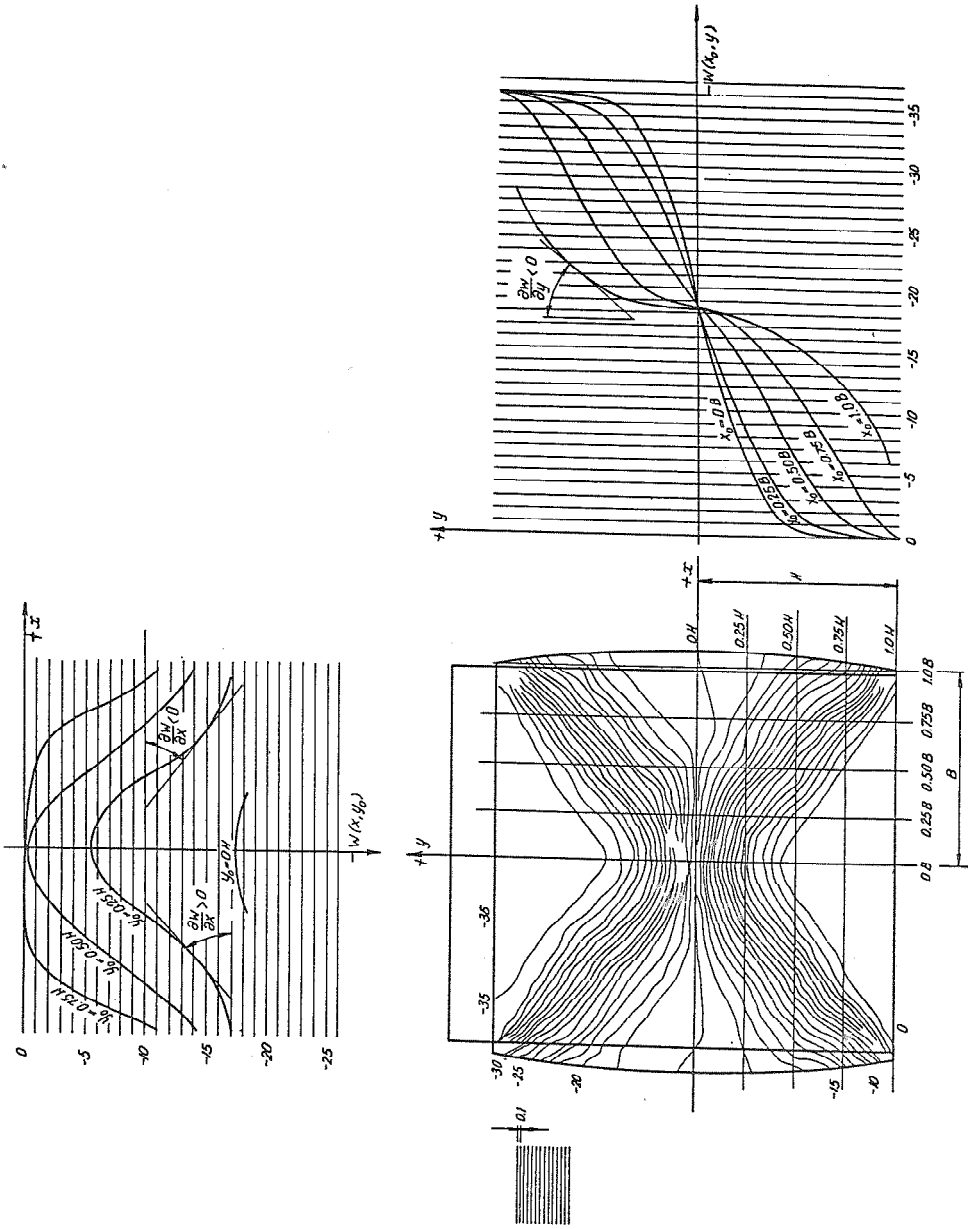
Način formiranja površine pomjeranja i odredjivanja znaka izvoda pomjeranja po koordinati može se vidjeti iz slika 1 i 2.

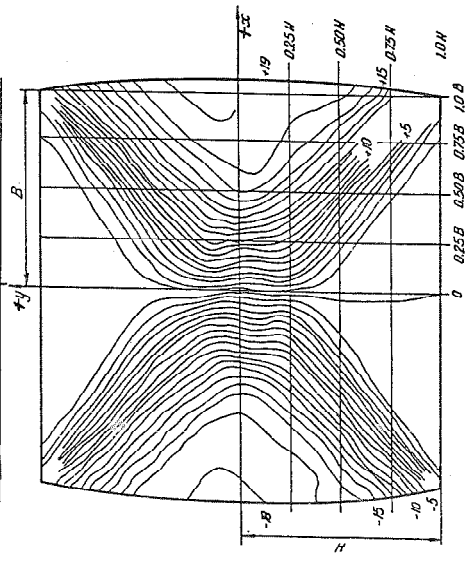
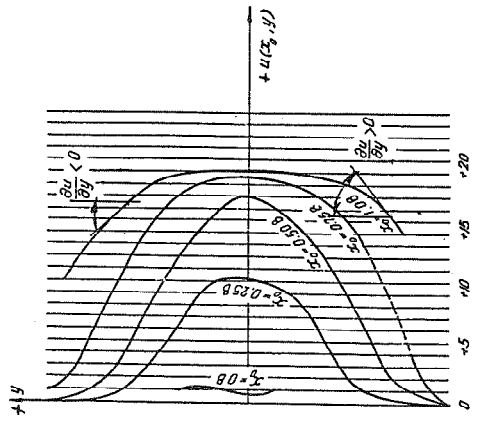
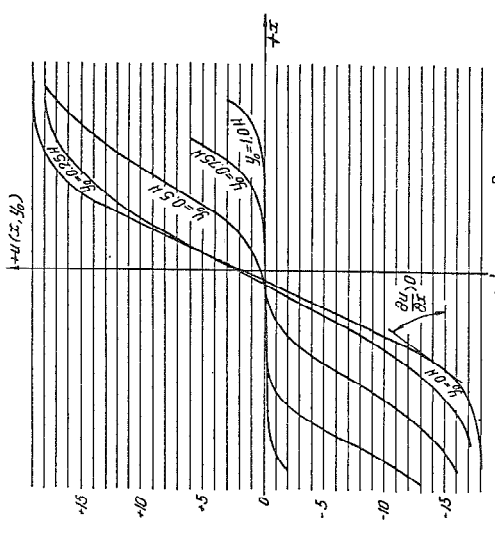
Na sl. 1 vidimo sistem linija moara vertikalnih pomjeranja dobijen eksperimentalnim putem u jednom presjeku deformisanog tijela a na sl. 2. to isto samo za horizontalna pomjeranja.

S obzirom na simetriju deformacije, na osama horizontalne i vertikalne simetrije povučene su u fizičkoj ravni ose X i Y sa pozitivnim pravcima označenim u slikama.

Da bi dobili vrijednost izvoda pomjeranja moramo nacrtati funkcije pomjeranja i grafički, u odredjenim tačkama, povući tangente na njih. S obzirom na simetriju, deformacije se mogu odrediti samo na jednoj četvrtini slike.

\*) Vladimir Mitković, dipl.ing., docent Mašinskog fakulteta u Sarajevu, ul. Omladinsko šetalište bb.





Orijentacija površine pomjeranja počinje od obilježavanja poredka svake linije moara u fizičkoj ravni. Na slici 1 svaka linija moara predstavlja geometrijsko mjesto tačaka jednakih pomjeranja u negativnom pravcu  $Y$  ose pri čemu je nulta linija na nepokretnom stolu mašine a - 36 linija na pokretnom pritiskivaču mašine. Negativni znaci reda označavaju da su ta pomjeranja u negativnom pravcu  $Y$  ose.

Ako površinu pomjeranja sada presječemo ravnima "B" u pravcu "Y" ose dobijamo presjek sa površinom pomjeranja  $W(X_0, Y)$  pri čemu se ove krive nalaze na negativnom dijelu "W" ose a njihov je izvod negativan u čitavom polju. Ovo se slaže sa fizičkom slikom problema jer je  $\epsilon_Y = \frac{\partial W}{\partial Y} < 0$  a slika moara je nastala sabijanjem probnog uzorka u pravcu  $Y$  ose.

Izvođe pomjeranja po koordinati  $X$  ( $\frac{\partial W}{\partial X}$ ) dobijamo iz presjeka površine pomjeranja sa ravnima "H" pri čemu se svi presjeci nalaze na negativnom dijelu "W" ose sa znacima izvoda kako je to označeno.

Na slici 2 vidimo sistem linija moare "u" pomjeranja.

Red linija označen je u odnosu na vertikalnu "Y" osu tako da su pomjeranja desno (pozitivan pravac "X" ose) pozitivna a u suprotnom pravcu negativna dok se nulta linija moara nalazi na osi simetrije.

Krive horizontalnog pomjeranja dobijene su presjekom površine pomjeranja ravnima "H" pri čemu tangenta na njih ima koeficijent pravca u odnosu na pozitivan smjer "X" i "u" ose pozitivan predznak. Ovo odgovara fizičkoj slici problema jer je  $\epsilon_x = \left(\frac{\partial u}{\partial X}\right) > 0$  tj. ove deformacije su deformacije istezanja.

Pošto su formirane krive pomjeranja u pravcu "X" ose na osnovu reda linija moara moguće je formirati presjeke površine pomjeranja sa ravnima "B" vodeći računa o redu linije moara i mjestu njenog presjeka sa površinom jednakog nivoa.

Znak izvoda (na desnom dijelu slike 2) se ocjenjuje u odnosu na pozitivan pravac "X" i "u" ose.

#### Literatura

- [1] Djureli A., Parks V. Analiz deformacij c ispoljzovanjem muara. "Mir" - Moskva 1974 g.

- [2] Šnajderovič R.M., Levin O.A. Izmerenie polnej plastičeskih deformacij metodom muara. "Mašinostroenie" Moskva 1972 g.
- [3] Poluhin P.I i dr. Deformacii i napržeženija pri obrabotke metallov davljeniem. "Metallurgija" - Moskva 1974 g.

V. Mitković

Prilog odredjivanju predznaka izvoda pomeranja po koordinati dobijenih metodom moara.

#### Rezimé

U priloženom radu se daje metoda kojom se može odrediti predznak deformacije dobijene metodom moara.

V. Mitković

Ein Beitrag zur Bestimmung des Vorzeichnes der Abbeitung der Verschiebung der Koordinate der nach Methode Moire.

#### Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist die Methode dargestellt, durch die der Vorzeichen der erhaltenen Deformation (Methode Moire) bestimmt werden kann.





V. Mitković \*

ODREDJIVANJE NEKIH PARAMETARA U PROCESU  
ODSECANJA PUNIH OKRUGLIH PROFILA

Prva operacija izrade jedne grupe valjčića za kotrljajuće ležajeve je hladno kovanje na dvoudarnim automatskim presama. Kovanje se obavlja u dvije faze od kojih je prva faza odsjecanje priprema na zadanu dimenziju a druga faza završno kovanje u otvorenom kalupu sa vijencom.

Pošto oblik odsječenog priprema, njegove mehaničke osobine kao i potrebnu silu odsjecanja definiše tehnološki proces odsjecanja sa njegovim uticajnim parametrima, u ovom radu smo se ograničili na analizu uticajnih faktora odsjecanja priprema.

Odsjecanje punog profilisanog materijala može se vršiti na različite načine i u različite svrhe tako da razlikujemo odsjecanje pomoću otvorenog noža i matrice, zatvorene matrice i otvorenog noža i zatvorene matrice i zatvorenog noža.

U dvoudarnim automatskim presama za kovanje valjčića odsjecanje se vrši pomoću zatvorene matrice i zatvorenog noža koji su izvedeni u obliku čaure.

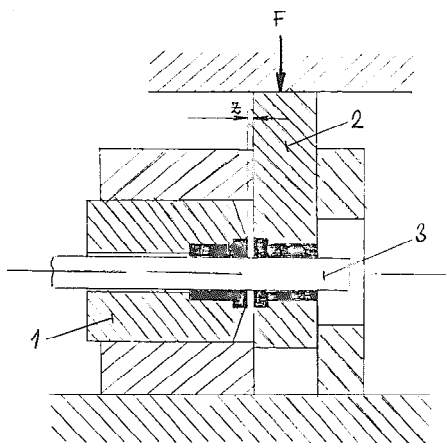
Prilikom ispitivanja uticajnih parametara procesa odsjecanja u laboratorijskim uslovima moraju se u maksimalnoj mogućoj mjeri imitirati realni uslovi procesa.

U tom cilju konstruisan je uređaj za odsjecanje koji u sebi sadrži stvarne elemente alata za odsjecanje (nož i matricu) sa mogućnošću varijacije prečnika žice i zazora za odsjecanje.

Za ostvarivanje sile odsjecanja predviđeni uređaj se stavlja u mašinu za ispitivanje materijala pomoću koje se može snimiti sila i dijagram sila - put.

---

\*) Vladimir Mitković, dipl.ing., docent Mašinskog fakulteta u Sarajevu, ul. Omladinsko šetalište bb



Sl. 1.

i po tome što je žica 3 koja se odsjeca, u toku odsjecanja aksijalno slobodna u oba pravca.

Prema [1], [2] brzina odsjecanja utiče na dubinu zone deformacije tako da sa njenim povećanjem ista opada. Na kvalitet reza u geometrijskom smislu prema ovim podacima brzina odsjecanja nema uticaja. S obzirom da je cilj bio istraživanje uticaja zazora na silu odsjecanja i kvalitet reza u geometrijskom pogledu, ovaj faktor se mogao zanemariti.

Što se tiče aksijalne pomjerljivosti žice koja je u realnim uslovima ograničena s jedne strane od valjaka za povlačenje a s druge strane od nepomičnog graničnika sa prednjeg kraja, smatralo se da ovo nije tehnološki faktor i to je bilo zanemareno.

Za istraživanje parametara odsjecanja korišćena je žica koja se primjenjuje za kovanje valjčića od Č.4146.

Ova žica se isporučuje u meko žarenom stanju vučena u toleranciji h9 pri čemu smo za istraživanje koristili prečnike  $\emptyset 8$ ,  $\emptyset 11,5$  i  $\emptyset 17,5$ .

Prije opita mjerili smo tvrdoću u podužnom presjeku uzorka žice koja je bila 210HB ( $187,5/2,5/30D^2$ ).

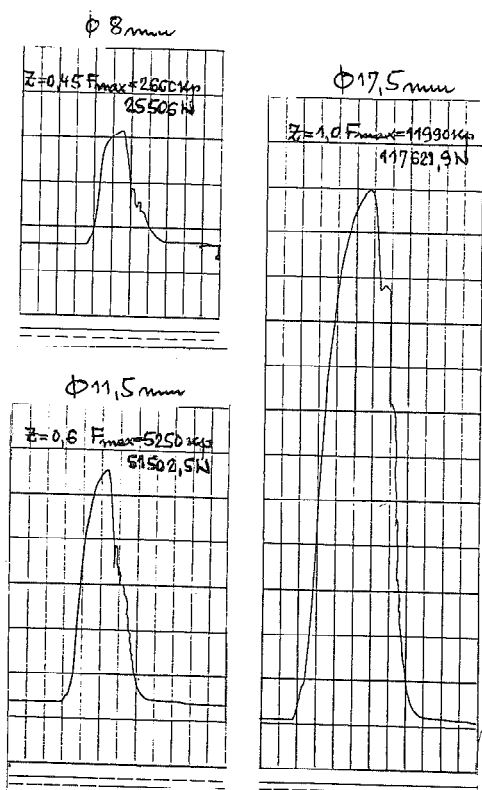
Na sl. 1 vidimo šemu primjenjenog laboratorijskog uređaja za odsjecanje sa matricom 1 koja se u odnosu na nož 2 može aksijalno pomjerati i regulisati zazor "Z". Uredjaj se stavlja između ravnih pritiskivača koji ostvaruju silu F.

U odnosu na realne uslove odsjecanja, predviđeno laboratorijsko ispitivanje se razlikuje po brzini odsjecanja koja je mala u odnosu na odsjecanje u presi

Isto tako snimljen je dijagram zatezne čvrstoće na sirovim neobradjenim epruvetama iz koga možemo izvući zaključak da je to materijal bez izrazite granice razvlačenja sa zateznom čvrstoćom od  $660 \text{ N/mm}^2$ .

Da bi utvrdili optimalan zazor sa gledišta geometrijskog oblika priprema kao i silu odsjecanja, izvršili smo opit sa oštrim nožem i matricom u kojem je variran zazor u određenim granicama. Tom prilikom za svaku vrijednost zazora snimana je maksimalna sila odsjecanja, dijagram sila - put i posmatram je oblik presjeka.

Na sl. 2 prikazani su neki dijagrami promjene sile odsjecanja za žice različitih presjeka.

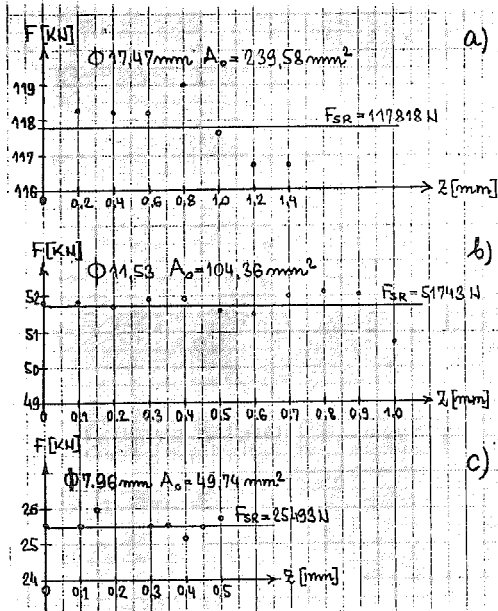


Sl. 2.

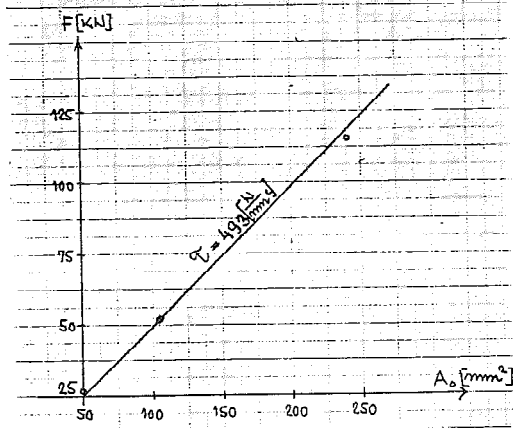
Kao što se vidi iz priloženih dijagrama maksimum sile nastupa prije odvajanja priprema. Odvajanje priprema se vidi na opadajućem dijelu krive kao diskontinuitet sa naglim padom sile koji je uzrokovao oscilaciju uređaja za zapisivanje. Normalan pad sile u ovom dijelu mora biti bez oštih prelaza što u ispitivanom slučaju ukazuje da je u momentu razdvajanja došlo do kidanja a ne do smicanja. Razlog je u tome što pretpostavljeni "metehnološki" parametar slo- bodnog aksijalnog pomjeranja žice i priprema dovodi do pomjeranja na kraju odsjecanja usljed čega se veza između kvaliteta presjeka i zazora nije mogla utvrditi.

Pošto konačno razdvajanje priprema nastupa po- slije dostizanja maksimalne

sile, bez obzira na pomenutu grešku, bilo je moguće odrediti smičući napon za dati materijal.



Sl. 3.



Sl. 4.

Kao prvo, konstatovano je da maksimalna sila odsjecanja ne zavisi od zazora (dijagrami a, b, c na sl. 3).

Dobijanje smičućeg napona po jedinici površine je tako izvršeno da je u dijagramu na sl. 4 na apscisi nanesen presjek žice a na ordinati sila.

Povlačenjem prave linije po metodi najmanjih kvadrata vidimo da eksperimentalne tačke vrlo dobro prate pravu odakle se vidi već poznata činjenica da je smičuća sila proporcionalna veličini presjeka.

Smičući napon je jednak tangensu ugiba nagiba prave i u našem slučaju iznosi  $493 \text{ N/mm}^2$ .

## Literatura

- [1] M.K. Das and S.A. Tobias. Recent advances in high-speed cropping. Metallurgia und Metal forming 1976, 43 No 2, 47-54
- [2] Herbs U. Genauschneiden von Werkstoffen zum Kalttfließenpressen, Werkstattstechnik 1970, 60, No 2, 66-70. 1970, 60, No 3. 131-137.

V. Mitković

Odredjivanje nekih parametara u procesu odsecanja punih okruglih profila

## Rezime

U radu je istraživano odsecanje punih profila kružnog poprečnog preseka.

Zaključeno je da sila odsecanja ne zavisi od zazora i da je strogo proporcionalna veličini poprečnog preseka.

V. Mitković

Das Festlegen von Parametern im Prozess des Abschneidens der vollrunden Profile

## Zusammenfassung

In der Arbeit ist das Abschneiden von vollen Profilen des kreisförmigen Querschnitts überprüft.

Es ist abgeschlossen, dass die Abschneidenskraft vom Spalt nicht abhängig ist und das sie der Grösse des Querschnitts strikt proportional ist.



MODELIRANJE SLOBODNOG STISKANJA  
KRUŽNOG I PRAVOKUTNOG ČELIČNOG PROFILA  
POMOĆU METODE RUBNIH ELEMENATA

I. Potrč, P. Leš, I. Glušič

1. UVOD

Rad obraduje numeričko modeliranje plastičnog oblikovanja čeličnog materijala po metodi rubnih elemenata (MRE), uzimajući u obzir elasto-plastični materijalni model.

Znamo da se materijal uslijed vanjskih opterećenja prvo ponaša kao elastično tijelo i potom prelazi u plastično stanje.

Postavljaju se brojna pitanja kao što su:

- gdje nastupa plastično područje,
- kako se ono širi po materijalu,
- kako fizikalnu pojavu opisati matematički.

Osnovne odgovore na ta pitanja daje teorija elasto-plasto mehanike. Za konkretna rješenja pojedinih primjera potrebne su posebne metode. Analiza tih problema predstavlja za praksu značajno procentualno smanjenje lomova, bolje iskorištenje materijala, ekonomičnije dimenzioniranje alata i sigurnije djelovanje konstrukcije.

2. TEORETSKA ISHODIŠTA KLASIČNE ELASTO-PLASTIČNE FORMULACIJE

Mehanička svojstva materijala dijelimo na elastična, plastična i viskozna. U našem ćemo se slučaju ograničiti na elastična i plastična svojstva. Pri elastičnoj formulaciji uzimamo u obzir osnovne jednačbe elasto statike (jednačbe ravnoteže, kinematičke jednačbe, jednačbe kompatibiliteta i jednačbe konstitucije).

Plastičnost opišemo pomoću granice tečenja (u našem slučaju po Misesu).

$$F(S_{ij}, k) = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} - k^2 = 0 \quad (1)$$

gdje je k granica tečenja a  $S_{ij}$  komponente devijatorskog tenzora, te zakona tečenja (Prandtl-Reušova jednačba)

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} S_{ij} \quad (2)$$

gdje je  $\dot{\lambda} > 0$  i predstavlja faktor proporcionalnosti.

doc. dr. Iztok Potrč, dipl. ing.,

prof. dr. Peter Leš, dipl. ing.,

Ivan Glušič, dipl. ing.,

Tehniška fakulteta Maribor, Smetanova 17, 62000 Maribor



Formalnim množenjem vremenskim inkrementom dobijemo inkrementalnu formulaciju, koja je karakteristična za elasto-plastično prikazivanje materijalnih svojstava.

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} \Delta t = \Delta u \Rightarrow \dot{u} \quad (3)$$

### 3. METODA RUBNIH ELEMENATA - MRE

#### Opća svojstva

Metoda rubnih elemenata (Boundary Element Method) predstavlja numerički pristup rješavanju problema elasto-plasto mehanike i kao takva predstavlja alternativu metodi konačnih elemenata (MKE). Osnovne prednosti te metode su:

- mali broj jednadžbi sistema,
- jednostavna priprema podataka,
- jednostavna obrada beskonačnih područja,
- selektivno i tačno vrednovanje unutarnjih tačaka,
- dobra aproksimacija singulariteta (koncentracije naprezanja).

Nasuprot metodi konačnih elemenata dobijemo po MRE punu, simetričnu i pozitivno definiranu matricu sistema.

#### Teoretske osnove

Matematičku podlogu MRE predstavlja Gaussov aksiom o divergenciji koji omogućava prevođenje integrala po volumenu u integral po površini koja zatvara taj volumen. Osnovnu diferencijalnu jednadžbu problema pretvorimo u integralni oblik. Tako dobijemo slijedeću integralnu jednadžbu:

$$\int b_k^i \dot{u}_k dV + \int p_k^i \dot{u}_k dA = \int u_k^i \dot{b}_k dV + \int u_k^i \dot{p}_k dA + \int \varepsilon_{jk}^i (\dot{\sigma}_{jk}^{th} + \dot{\sigma}_{jk}^p) dV \quad (4)$$

koja predstavlja generalizirani oblik Bettijeva drugog aksioma na priraštaju opterećenja.

Kod tretiranja nelinearnih problema, kao npr. elasto plastičnosti i nestacionarnih termičkih opterećenja (termo šok), ne možemo svih integralnih udjela transformirati na rub, već u jednadžbama ostaju udjeli integrala po unutrašnjosti, što uvjetuje i djelomičnu diskretizaciju unutrašnjosti. Za elasto-plasto problem osnovna jednadžba na inkrementu glasi:

$$C_{ik} [\dot{u}_k - \dot{\bar{u}}_k] = \int_A [u_{ik}^* (\dot{p}_k - \dot{\bar{p}}_k) - p_{ik}^* (\dot{u}_k - \dot{\bar{u}}_k)] dA + \int_V \sigma_{ijk}^* \dot{\varepsilon}_{jk}^p dV \quad (5)$$

odnosno za naprezanja u unutrašnjosti

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} - \bar{\sigma}_{ij} &= \int_A [U_{kij}^* (p_k - \bar{p}_k) - p_{kij}^* (u_k - \bar{u}_k)] dA - \delta_{ij} \frac{\alpha E}{1 - 2\nu} \theta \\ &+ \int_V \Sigma_{ijk}^* \varepsilon_{km}^p dV - D_{ij} [\varepsilon_{km}^p(\xi)] \end{aligned} \quad (6)$$

gdje su sa crticom povrh oznake označena partikularna rješenja prostorskih opterećenja (gravitacija, centrifugalne sile, opterećenja konstantnog temperaturnog polja).

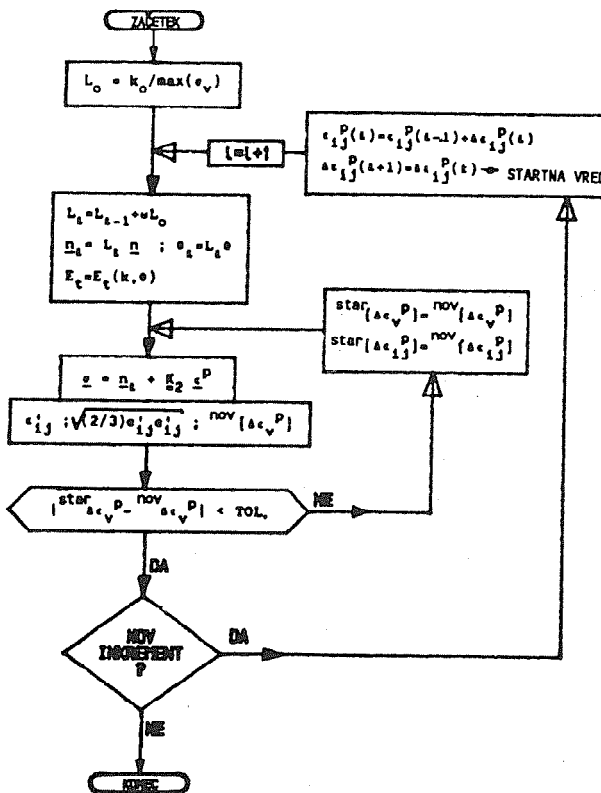
Komponente tenzora naprezanja na rubu dobijemo djelomično iz osnovne jednačbe (jedin. 5) a djelomično iz numeričke diferencijacije pomaka.

### Algebraizacija integralne enačbe

Kod praktičnih modela nije moguće analitičko rješavanje integralne jednačbe pa je rješavamo numerički. U tom smislu rub diskretiziramo na konačan broj rubnih elemenata, a unutrašnjost (gdje je problem nelinearan - plastična zona) prekrijemo integracijskim ćelijama koje ne donose novih nepoznanica u sistem jednačbi. Kada definiramo vrijednosti svih utjecajnih čvorova na rubu dobijemo na osnovu (jedin. 5) slijedeći sistem integralnih jednačbi:

$$\underline{A} \underline{\dot{x}} = \underline{f} + \underline{S} \underline{\dot{\epsilon}}^p \quad (7)$$

gdje  $\underline{\dot{x}}$  predstavlja nepoznate i  $\underline{f}$  poznate rubne vrijednosti.



Slika 1: Shema iteracijskog postupka

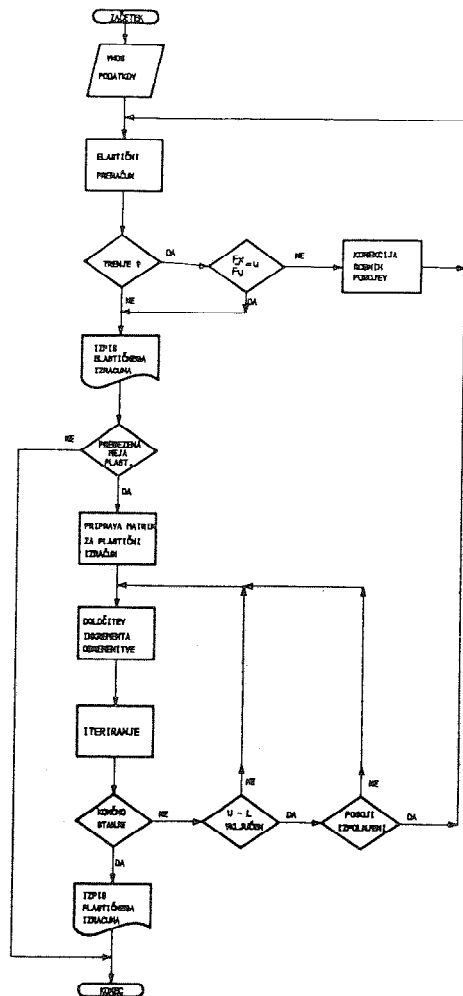
Rješenje toga sistema je:

$$\dot{x} = \dot{m} + \underline{K}_1 \dot{\epsilon}^p \quad (8)$$

Analogno odredimo naprezanja u unutrašnjosti (jedn. 6) i na rubu:

$$\dot{\sigma} = \dot{n} + \underline{K}_2 \dot{\epsilon}^p \quad (9)$$

Iz formulacije je vidljivo da plastične udjele uzimamo kao poznate vrijednosti, koje u stvari ne poznajemo, te ih određujemo iterativno postupkom kojega je predlagao Mendelson (1968). Osnovna ideja toga postupka je odrediti naprezanja na osnovi opterećenja.



Slika 2: Shema UPDATE LANGRANGE postupka

U koliko ukupno naprezanje u nekom čvoru prekorači granicu tečenja predpostavljamo u tom čvoru plastične deformacije koje odredimo na osnovu povijesti opterećivanja bilinearnog materijalnog modela ( $E, E_t$ ). Veličina tangencijalnog modula ( $E_t$ ) zavisi u našem modelu prije svega od materijala i temperature. Iteracijski postupak ponavljamo do željene tačnosti plastičnih deformacija. Taj postupak je detaljno prikazan na shemi (sl. 1).

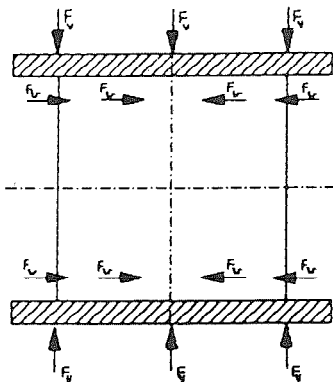
Za proračune elemenata, na kojima dolazi do većih globalnih promjena geometrije kod niskih specifičnih deformacija, koristimo "UPDATED LAGRANGE" postupak. Praktično to znači da se kod velikih deformacija mijenjaju geometrijski i mehanički rubni uvjeti pojedinih diskretnih tačaka, te je potrebno definirati nove rubne tačke uzimajući u obzir cijelokupnu povijest opterećivanja. Aplikacija takve procedure dana je na shemi (sl. 2).

#### 4. APLIKACIJE

Upotrebu toga postupka prikazat ćemo sa dva karakteristična primjera. Prvi primjer obraduje stiskanje kvadra uzimajući u obzir trenje na vanjskim kontaktnim površinama, a drugi stiskanje valjka.

##### Stiskanje kvadra

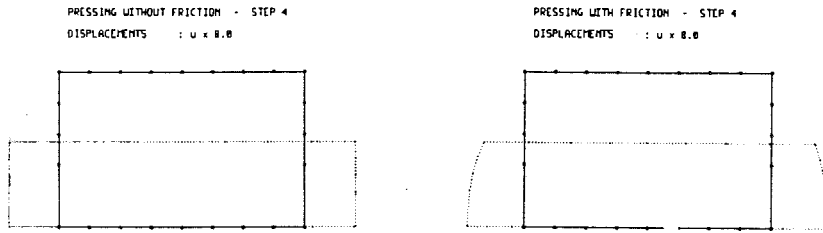
Kvadar koji stiskamo među dvjema ravnim, paralelnim pločama počne se, zbog vanjskih sila, deformirati. Kao posljedica deformacije materijala, javljaju se na kontaktnim površinama kvadra i alata sile trenja (sl. 3).



Slika 3: Stiskanje kvadra

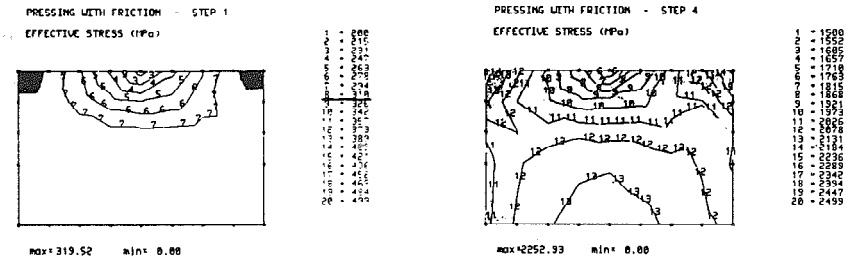
Srž problema je u tome da ne poznajemo niti raspodjele normalnog opterećenja na kontaktnoj površini kvadra, koja nastaje kao posljedica stiskanja, niti sile trenja kao posljedice normalnog opterećenja. Tako smo iskoristili mogućnost da problem riješimo po prije opisanom postupku koji omogućava usporednu korekciju rubnih uvijeta u našem, konkretnom primjeru, sile trenja. Rezultat proračuna je zbog preglednosti i jasnoće prikazan grafički.

Na (sl. 4) su prikazane deformacije po klasičnom proračunu bez, kao i deformacije koje nastupaju uzimanjem trenja u obzir.



Slika 4: Deformacije kvadra

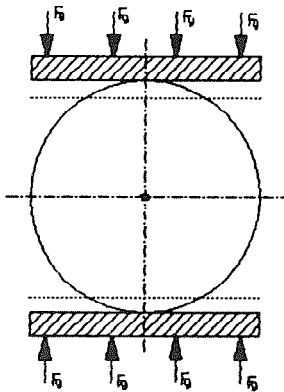
Na (sl. 5) je prikazano postepeno širenje plastične zone modela koji uključuje trenje.



Slika 5: Širenje plastične zone

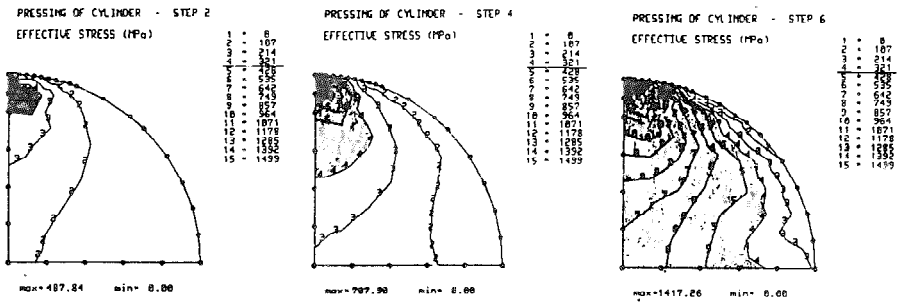
**Stiskanje valjka**

Valjak koji stiskamo među dvjema ravnim pločama se širi. Istovremeno se povećava kontaktna površina među valjkom i pločama. Pored toga se na kontaktnim površinama javlja trenje (kao i kod kvadra).

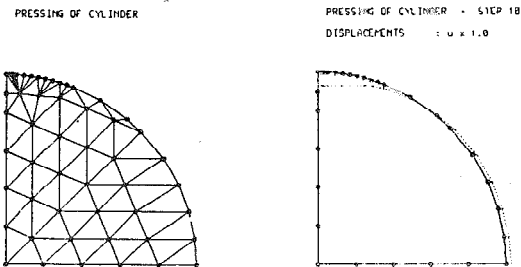


Slika 6: Stiskanje valjka

Srž problema je, za ovaj slučaj, u tome da se iz koraka u korak povećava broj kontaktnih tačaka šta znači da moramo rubne uvjete stalno mijenjati, razumljivo uzimajući u obzir cjelokupnu povijest opterećivanja. Sve to omogućuje LAGRANGE-ov postupak. Rezultate ćemo i u ovom primjeru prikazati grafički. Na (sl. 7) je vidljivo, iz uzastopnih snimaka, širenje plastične zone. Slika (sl. 8) prikazuje početno i konačno deformirano stanje.



Slika 7: Širenje plastične zone



Slika 8: Početno i konačno deformirano stanje

## 5. ZAKLJUČAK

Iz navedenog teksta moguće je zaključiti da je Metoda rubnih elemenata postupak koji omogućava rješavanje kompleksnih problema.

## 6. LITERATURA

1. Brebia C., Talles J.F., Wrobel L.C., Boundary Element Techniques, Springer - Verlag New York, 1984
2. Mendelson A., Plasticity - Theory and Application, Mac Millanco, New York 1968
3. Potrč I., Zur Behandlung temperaturabhengiger elastoplastischer Probleme mittels Randenelement - methode, Disertation, University of Erlangen, 1987
4. Potrč I., Alujevič A., Termo - elasto - plastinost z robnimi elementi, CAD/CAM PPPR, Znanstveni rad A3.02 Scientific paper, 59-64
5. Prelog E., Elasto in plasto mehanika v strojništvu, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1966

I. Potrč, P. Leš, I. Glušič

### MODELLING OF UPSETTING PROCES BY THE BOUNDARY ELEMENT METHOD FOR CYLINDRICAL AND RECTANGULAR STEEL PROFILES

#### S u m m a r y

The modelling of upsetting proces by Boundary Element Method and by considering the elasto-plastic material model is discussed in this paper. It is known that due to external forces the material behaves like an elastic body and then turns into the plastic state. In practice, the study of this problem ensures a lower percentage of fractures, a better exploitation of materials, more economic tool dimensions and safer operation.

B. Rančić\*)

SILA ZATVARANJA ALATA PRI OBLIKOVANJU NESTISLJIVIM  
FLUIDOM DELOVA SA BOČNIM ODVODIMA

1. UVOD

Oblikovanje nestišljivim fluidom delova sa bočnim ispučenjima - odvodima kao što su: T-račve, krstaste račve, spojnice za ram bicikle i dr., moguća je jedino u razdvojevom alatu. Bilo da se radi o dvodelnom, trodelnom ili višedelnom alatu, alat mora da bude razdvojev, jer bi u protivnom bilo onemogućeno vadjenje gotovog dela iz alata. Pošto polazaj ravni razdvajanja utiče na karakter odvijanja procesa deformisanja, silu potrebnu za zatvaranje alata, konstrukciju i složenost alata, a samim tim i na udobnost rukovanja alatom, to je u radu izvršena analiza mogućih položaja ravni razdvajanja alata i izabran optimalan položaj.

Za optimalan položaj, kada se ravan razdvajanja alata podudara sa ravni uzdužne simetrije dela, izvedeni su izrazi za sračunavanje minimalno potrebne sile zatvaranja alata i to za slučaj oblikovanja T-račve, krstaste račve i spojnice za ram bicikle.

2. OPIS PROCESA OBLIKOVANJA

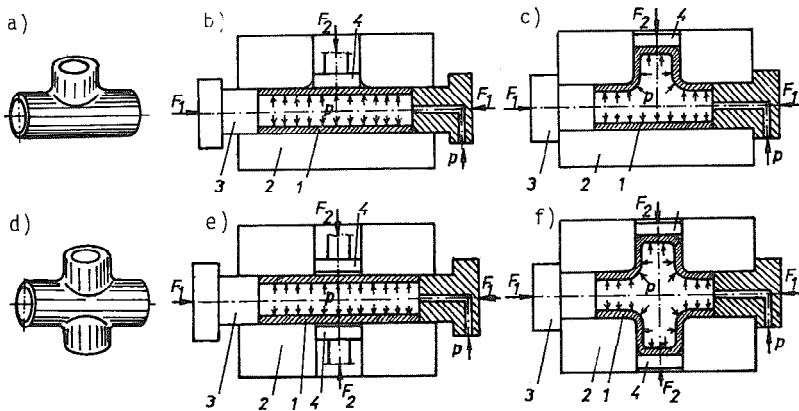
Proces oblikovanja T-račve (sl. 1,a) prikazan je na slici 1,b,c . Pod dejstvom aksijalnih tiskača (3), tj. sila sabijanja  $F_1$  i hidrostatičkog pritiska p nestišljivog fluida unutar cevi (1) vrši se sabijanje cevi. Pošto je slobodno proširivanje cevi sprečeno zidovima alata (2), kao jedina mogućnost za tečenje materijala, javlja se uticanje materijala u radijalno postavljenu otvor, čime se formira bočno ispučenje - odvod. Da bi se sprečilo razaranje vrha odvoda, bočnim pridržiivačem (4) deluje se na vrh odvoda silom  $F_2$ . Dakle, formiranje odvoda vrši se na račun uticanja materijala iz cevi, pri čemu postoji ak-

\*) mr Bojan Rančić, dipl. ing., asistent Mašinskog fakulteta u Nišu,  
ul. Beogradska br. 14, 18000 Niš

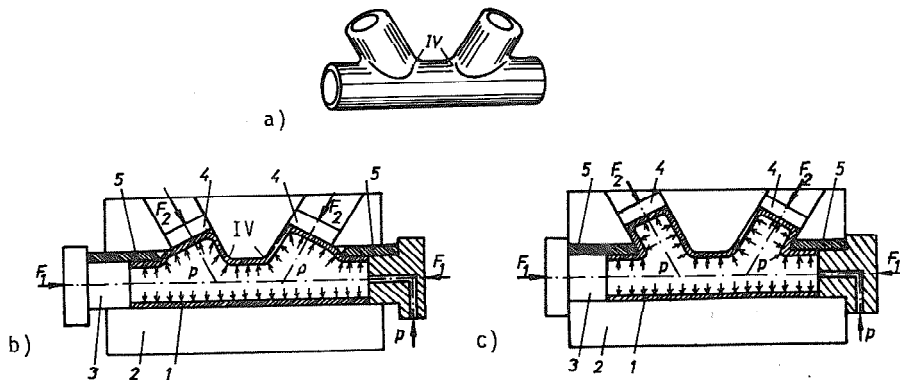


sijalno (pod dejstvom tiskača) i tangencijalno (pod dejstvom pritiska u nestišljivom fluidu) uticanje materijala u odvod, tako da je proces deformisanja simetričan u odnosu na ravan uzdužnog preseka T-račve, tj. ravan prikazanu na sl. 1,b,c.

Oblikovanje krstaste račve (sl. 1,d) vrši se analogno oblikovanju T-račve, samo što sada postoje dva, međjusobno naspramna odvoda, tj. dva bočna pridrživača (4), sl. 1,e,f.



slika 1



slika 2

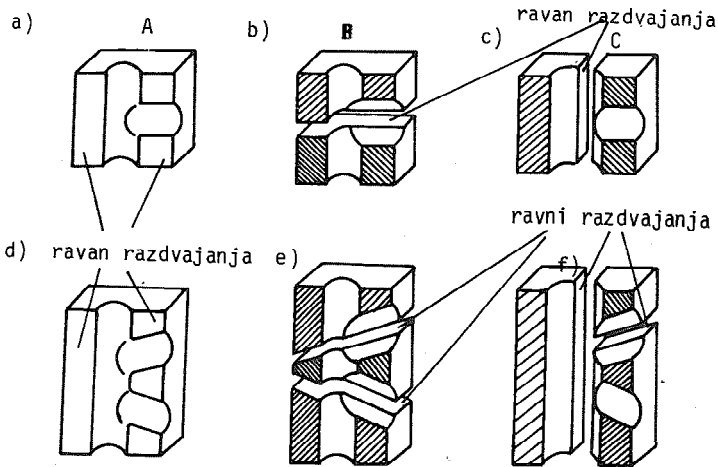
Pri oblikovanju spojnice za ram bicikle (sl. 2,a) proces deformisanja je sličan procesu oblikovanja T-račve, samo što sada, zbog postojanja dva odvoda, koji se nalaze jedan pored drugog na istoj strani cevi, mora da se vrši i do-

punsko sužavanje odvoda pokretnim segmentima (poz.5, sl. 2,b,c). Naime, u prvoj fazi deformisanja (sl. 2,b) formiranje odvoda analogno je procesu formiranja odvoda kod T-račve, samo što u zonama IV (sl.2,a,b) na koje se ne prostire uticaj aksijalnih sila sabijanja  $F_1$ , nastaje naponsko stanje dvoosnog rastezanja, što veoma brzo dovodi do razaranja odvoda u tim zonama. Da bi se ovo sprečilo, u drugoj fazi deformisanja (sl. 2,c), posle formiranja odvoda male visine, vrši se sabijanje odvoda pokretnim segmentima, čime se postiže promena naponskog stanja i dobijanje odvoda znatnije visine. I u ovom slučaju proces deformisanja je simetričan u odnosu na ravan uzdužne simetrije dela.

### 3. ODREĐIVANJE OPTIMALNOG POLOŽAJA RAVNI RAZDVANJANJA ALATA

Oblikovanje delova sa bočnim odvodima nestišljivim fluidom moguće je jedino u razdvojevom alatu, jer bi, u protivnom, bilo onemogućeno vadjenje gotovih delova. Položaj ravni razdvajanja alata utiče na veličinu sile zatvaranja alata, karakter odvijanja procesa oblikovanja, kao i na samu konstrukciju alata. Postoje tri karakteristična položaja ravni razdvajanja alata, koji su za slučaj T-račve, kao predstavnika delova sa dve ravni simetrije (T- i krstaste račve), prikazani na slici 3,a,b,c, a to su:

- A) Ravan razdvajanja podudara se sa ravni uzdužne simetrije dela (sl. 3,a),
- B) Ravan razdvajanja upravna je na osu glavne cevi i podudara se sa ravni uzdužne simetrije odvoda (sl. 3,b) i
- C) Ravan razdvajanja prolazi kroz osu cevi i upravna je na ravan uzdužne simetrije dela (sl. 3,c).



slika 3

Sila potrebna za zatvaranje alata najveća je kod varijante A), jer je u tom slučaju najveća površina projekcije dela na ravan razdvajanja, pa se čini da su varijante B) i C) povoljnije. Međutim, postojanje površina razdvajanja neizbežno dovodi do malog razdvajanja polovina alata (u oblasti elastičnosti) tokom procesa deformisanja, do uticanja materijala u tako nastale zatore i omtanja tečenja materijala u pravcu upravnom na ravan razdvajanja. Kako je tečenje materijala simetrično u odnosu na ravan uzdužne simetrije, to varijante B) i C) otežavaju plastično tečenje materijala, pa je, zbog povećanog habanja ivica alata po ravni razdvajanja, smanjen vek trajanja alata.

Osim toga, u slučaju izrade delova sa samo jednom - uzdužnom ravni simetrije, kao što je spojnica za ram bicikle, varijante B) i C) sa dvodelnim alatom ne mogu više da se primene, jer je onemogućeno vadjanje gotovog dela. U ovakvim slučajevima mora da se primeni trodelni alat (sl. 3,e,f), što usložnjava i sam proces izrade alata, a javljaju se i problemi vođenja pojedinih delova alata, kao i otežano rukovanje alatom.

Najjednostavnija izrada delova alata, najpovoljniji uslovi deformisanja, najmanje habanje alata i najlakše rukovanje alatom usloveli su da je varijanta A), tj. slučaj kada je ravan razdvajanja alata identična sa ravni uzdužne simetrije dela (sl. 3,a,d), optimalna, bez obzira što se kod ove varijante zahteva najveća sila, koja je potrebna za održavanje alata u zatvorenom položaju.

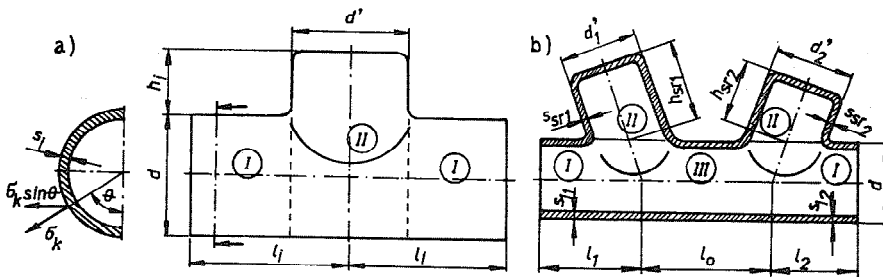
Zbog toga, daće se samo metodologija za proračun sile zatvaranja alata  $F_{za}$  u slučaju zatvaranja alata po ravni uzdužne simetrije dela. Za druge varijante ravni razdvajanja alata metodologija određivanja sile zatvaranja alata biće analogna.

#### 4. PRORAČUN SILE ZATVARANJA ALATA

Na kontaktnim površinama obradka i alata javljaju se normalni kontaktni naponi  $\bar{\sigma}_k$ , koji teže da razdvoje polovine alata. Presom, nekim drugim uredjajem ili samom konstrukcijom alata mora se obezbediti sila zatvaranja alata, koja je veća, ili, u najgorem slučaju, jednaka sili otvaranja alata  $F_{0a}$ , koja predstavlja rezultantu svih komponenta kontaktnog napona, koje deluju na jednu polovinu alata, a upravne su na ravan razdvajanja alata.

##### a) Slučaj T- i krstaste račve

Pri izradi T-račve u različitim zonama kontakta alata i obradka i normalni kontaktni naponi  $\bar{\sigma}_k$  su različiti. Zbog toga se kontaktna površina obradka deli na dve zone: zonu glavne cevi (zone I, sl. 4,a) i zonu odvoda (zona II).



slika 4

U zoni glavne cevi (zona I) sila otvaranja alata sračunava se na osnovu izraza (videti i sl. 4,a - levo):

$$F_{oa}^I = \int_{d/2}^{l_1} \int_0^{\pi} \bar{\sigma}_k \sin \theta \cdot \frac{d}{2} \cdot d\theta \cdot dz. \quad (1)$$

U zoni glavne cevi, u kojoj vlada ravansko deformaciono stanje, jer je proširivanje cevi sprečeno zidovima alata, normalni kontaktni naponi određuju se po izrazu, / 1/:

$$\bar{\sigma}_k = -(p + \frac{\beta K}{2} \ln(\frac{d}{d - 2s_i})). \quad (2)$$

Smenom jednačine ( 2 ) u ( 1 ) i uzimajući u obzir da je, zbog ravanskog deformacionog stanja, bezdimenzionalni koeficijent  $\beta = 2\sqrt{3}/3$ , posle integraljenja se dobija:

$$F_{oa}^I = (p + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot K \cdot \ln(\frac{d}{d - 2s_i})) (l_1 - \frac{d}{2}) \cdot d, \quad (3)$$

gde su:

- p - pritisak u nestišljivoj fluidu,  $N/mm^2$ ,
- K - specifični deformacioni otpor na krajevima cevi,  $N/mm^2$ ,
- d - prečnik cevi (spoljašnji), mm,
- d' - prečnik odvoda (spoljašnji), mm,
- s<sub>i</sub> - debljina zida cevi na krajevima cevi, mm i
- l<sub>1</sub> - rastojanje od poprečne ravni simetrije do kraja cevi, mm.

Ukoliko su krajevi glavne cevi (zone I) međusobno jednaki, tada se sila otvaranja alata usled kontaktnih napona na glavnoj cevi sračunava po izrazu:

$$F_{Oa_{uk}}^I = 2 \cdot F_{Oa}^I, \quad (4')$$

a ako nisu:

$$F_{Oa_{uk}}^I = \sum_{i=1}^2 F_{Oa_i}^I. \quad (4'')$$

Plastično deformisanje na odvodu završava se u početnoj fazi deformisanja. U stacionarnoj fazi visina odvoda povećava se samo na račun uticanja materijala iz glavne cevi, pa se može usvojiti da se u ovoj fazi deformisanja odvod nalazi u stanju elastičnosti. Usvaja se da su normalni kontaktni naponi konstantni i približno jednaki vrednosti pritiska u nestišljivom fluidu, pa je:

$$F_{Oa}^{II} = p(d + h_i) \cdot d, \quad (5)$$

gde je:  $h_i$  - visina odvoda, mm.

Ukupna sila zatvaranja alata sračunava se prema izrazu:

$$F_{za} \cong F_{Oa} = F_{Oa_{uk}}^I + F_{Oa}^{II}. \quad (6)$$

U slučaju oblikovanja krstaste račve, sila  $F_{Oa}^I$  sračunava se na isti način kao i kod T-račve, dok se sila otvaranja alata  $F_{Oa_{uk}}^I$  usled kontaktnih napona na odvodu sračunava kao:

$$F_{Oa}^{II} = p(d + 2h_i)d, \quad (7)$$

jer kod krstaste račve postoje dva odvoda.

Ukupna sila otvaranja alata  $F_{Oa}$  nije konstantna u toku procesa oblikovanja. Povećava se, pre svega, zbog porasta vrednosti specifičnog deformacionog otpora  $K$ , kao i visine odvoda  $h_i$ , dok se smanjuje zbog smanjenja dužine glavne cevi  $l_i$ . Sila  $F_{Oa}$  najpre raste do nekog trenutka, kada očvršćavanje materijala postaje manje intenzivno (što je uslovljeno oblikom krive očvršćavanja), a dužina glavne cevi se i dalje smanjuje, što uslovljava postepeno smanjenje sile  $F_{Oa}$  sve do završetka procesa oblikovanja. Analitičko odredjivanje maksimuma sile otvaranja alata  $F_{Oa}$  nije moguće, jer se krive očvršćavanja razlikuju od materijala do materijala. Eksperimentalnim ispitivanjima / 2/ utvrđeno je, da se maksimum sile otvaranja alata javlja pri visini odvoda  $h_i = (0,2-0,4)d$ , tako da se sila zatvaranja alata  $F_{za}$  sračunava za ovu vrednost visine odvoda i zadržava konstantnom tokom čitavog procesa.

## b) Slučaj spojnice za ram bicikle

Pri izradi delova tipa spojnice za ram bicikle (sl. 2,a i sl. 4,b) sila otvaranja alata  $F_{oa}$  određuje se na kraju procesa, jer je, zbog dopunskog sužavanja odvoda dužina glavne cevi ostala znatna, a specifični deformacioni otpor, visine odvoda i kontaktni naponi na spoljašnjim površinama odvoda najveći su na kraju procesa oblikovanja.

I ovde se sila otvaranja kalupa određuje kao suma sila otvaranja u pojedinim zonama (sl. 4,b). Sila otvaranja kalupa na krajevima glavne cevi (zone I) određuje se na isti način kao i kod T-račve. Na delu između odvoda (zona III) gde ne dolazi do plastičnog deformisanja, može se usvojiti da je normalni kontaktni napon konstantan i jednak pritisku u nestišljivom fluidu. Uvodi se i pretpostavka, da su normalni kontaktni naponi na svakom od odvoda (zone II) konstantni, ali, zbog dopunskog sužavanja odvoda, nisu više jednaki pritisku u nestišljivom fluidu, već se sračunavaju po metodologiji, koja je data u literaturi / 1/ i / 3/.

Ukupna sila otvaranja, odnosno zatvaranja alata, pri oblikovanju delova tipa spojnice za ram bicikle, uzimajući u obzir uvedena pojednostavljenja, sračunava se prema izrazu:

$$F_{za} \cong F_{oa} = \sum_{i=1}^2 \left[ \left( p + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot K_i \ln \left( \frac{d}{d - 2s_{maxi}} \right) \right) \left( l_i - \frac{d_i'}{2} \right) d \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^2 d_i' \cdot h_{sri} \left[ p + \frac{2\beta_i K_i' s_{sri}}{d_i - s_{sri}} - \frac{p \cdot \bar{u} (d_i' - 2s_{sri})^2 - 4F_{2i}}{2 \cdot \bar{u} (d_i' - s_{sri})^2} \right] +$$

$$+ p d \cdot \left[ l_0 + \frac{1}{2} (d_1' + d_2') \right], \quad (8)$$

gde su:

$p$  - pritisak u nestišljivom fluidu,  $N/mm^2$ ,

$K_i, K_i'$  - specifični deformacioni otpor materijala na kraju cevi i odvodu, respektivno,  $N/mm^2$ ,

$d, d_i'$  - spoljašnji prečnik glavne cevi i odvoda, respektivno,  $mm$ ,

$\beta_i$  - bezdimenzionalni koeficijent, koji uzima u obzir uticaj srednjeg normalnog napona na odvodu,

$F_{2i}$  - sila bočnog pridržavanja vrha odvoda,  $N$ ,

$s_0$  - debljina zida pripremljena (početne cevi),  $mm$ ,

$s_{maxi} = s_{1i}$  - debljina zida na kraju glavne cevi,  $mm$ ,

$s_{sri} = (s_0 + s_{maxi})/2$  - srednja debljina zida na odvodu,  $mm$ ,

$h_{sri}$  - visina odvoda,  $mm$ ,

$l_0, l_i$  - dužina cevi, koja se ne deformiše i dužina kraja glavne cevi, respektivno,  $mm$ .

Način, na koji se određuju uticajne veličine iz jednačine ( 8 ), detaljno je obrazližen u radu / 1/.

## 5. ZAKLJUČAK

Slučaj, kada se ravan razdvajanja alata podudara sa ravni uzdužne simetrije dela, koji se oblikuje nestišljivim fluidom, predstavlja optimalnu varijantu za razdvajanje polovina alata.

Na osnovu izraza za sračunavanje sila zatvaranja alata pri izradi T- i krstaste račve i spojnice za ram bicikle, uočava se da najveći uticaj na veličinu sile zatvaranja alata imaju: dimenzije gotovog dela, vrsta materijala i relativna debljina zida cevi  $s_0/d$ . I pored relativno jednostavnih izraza za sračunavanje pojedinih sila, većina veličina u tim izrazima nije konstantna, a pojedine veličine ne mogu teorijski egzaktno da se obuhvate (na primer: veličina specifičnog deformacionog otpora materijala), tako da se pri praktičnim radovima u ovoj oblasti preporučuje eksperimentalna provera.

## R e f e r e n c e

- / 1/ Rančić B.: Naponsko i deformaciono stanje pri proširivanju cevi nestišljivim fluidom sa definisanjem analitičkih zavisnosti za pritisak fluida i aksijalnu silu sabijanja cevi, magistarska teza, Univerzitet u Nišu - Mašinski fakultet, Niš, 1987.
- / 2/ Bogojavlenskii K.N., Serjakov E.I.: Izgotovlenie složnih polih detalei, Mašinostroenie, Leningrad, 1979.
- / 3/ Rančić B.: Odredjivanje radnog pritiska i sila pri oblikovanju T-račve sa sužavanjem odvoda, Zbornik radova sa 22. SPMJ, Ohrid, 1989.
- / 4/ Rančić B., Stoiljković V.: Naponsko-deformaciono stanje na delovima tipa T-račve dobijenim proširivanjem nestišljivim fluidom na hladno, Zbornik radova sa 21. SPSJ, Opatija, 1987
- / 5/ Rančić B., Stoiljković V.: Naponsko-deformaciono stanje pri proširivanju nestišljivim fluidom delova tipa spojnice za ram bicikle, Zbornik radova sa 21. SPSJ, Opatija, 1987.

B. Rančić

CLOSING TOOL FORCE FOR HYDRAULIC COLD FORMING PROCESS OF PIECES WITH LATERAL BULGES

### - S u m m a r y -

In this work was made a determination of the opening plane of the tool for oil hydraulic cold forming proces for producing od T-forks and head-lug pieces for use in bicycles.

Optimized opening plane is equal with the plane of longitudinal symmetry of pieces.

There are also given equations for closing tool force calculating.

---

## 22 ЈУГОСЛОВЕНСКО СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

---

B. Rančić<sup>\*</sup>)

### ODREĐIVANJE RADNOG PRITISKA I SILA PRI OBLIKOVANJU T-RAČVE SA SUŽAVANJEM ODVODA

#### 1. UVOD

Da bi se obezbedilo dobijanje T-račve sa maksimalno mogućom visinom odvoda potrebno je odabrati optimalnu shemu deformisanja i poznavati osnovne parametre procesa oblikovanja nestišljivim fluidom po II-oj klasi postupaka.

Poznavanje parametara procesa važno je, kako sa aspekta pravilnog izbora mašine, pomoćnih uređaja i opreme, sredstva za podmazivanje i sl., tako i sa aspekta mogućnosti regulisanja tih parametara u toku procesa oblikovanja, da bi se dobile T-račve bez defekata, tj. smanjio škart u proizvodnji.

#### 2. OBLIKOVANJE T-RAČVE SA SUŽAVANJEM ODVODA

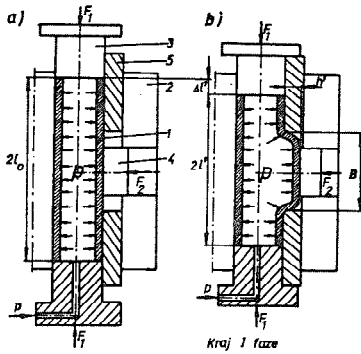
Za dobijanje T-račve sa znatnom visinom odvoda, koja je jednaka ili čak i veća od prečnika cevi, mora se primeniti shema oblikovanja nestišljivim fluidom sa aksijalnim sabijanjem cevi, bočnim pridržavanjem vrha odvoda i dopunskim sužavanjem odvoda (slika 1).

Pripremak (cev, poz.1) postavlja se u razdvojni dvodelni alat (2). Oblikovanje bočnog ispupčenja - odvoda vrši se pod dejstvom nestišljivog fluida, a prema obliku radijalnog otvora, koji obrazuju pokretni segmenti (5) i alat. Istovremeno, vrši se i sabijanje cevi aksijalnim tiskačima (3), čime se sprečava lokalizacija žarišta deformacija na relativno usku zonu odvoda. Da bi se sprečilo razaranje vrha odvoda koristi se bočni pridrživač (4). Ovakav proces odvija se sve dok aksijalni tiskači ne dodju u dodir sa pokretnim segmentima i predstavlja I-vu fazu oblikovanja (sl. 1,a,b). U ovoj fazi poprečni presek odvoda je "pravougaoni" (sl. 2,a) ili eliptičan (sl. 2,b), što zavisi od oblika pokretnih segmenata, koji u ovoj fazi oblikovanja miruju.

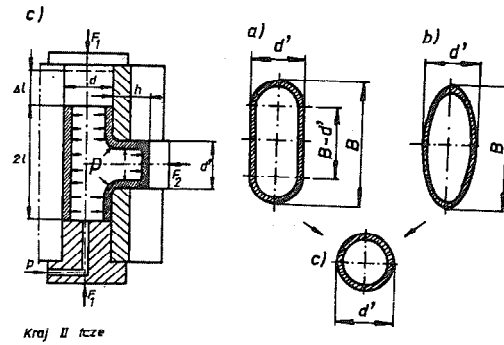
---

<sup>\*</sup>) mr Bojan Rančić, dipl. ing., asistent Mašinskog fakulteta u Nišu,  
ul. Beogradska br. 14, 18000 Niš





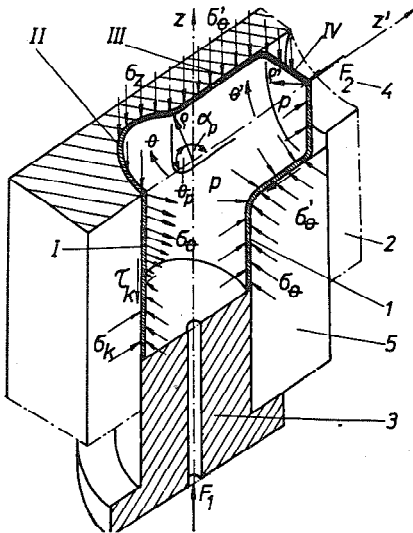
slika 1



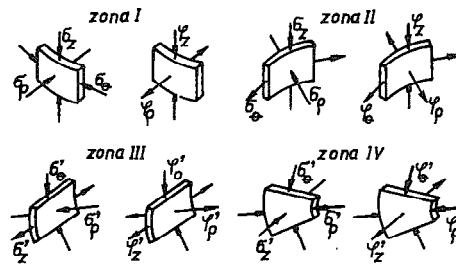
slika 2

U drugoj fazi (sl. 1,c) dolazi do zajedničkog kretanja aksijalnih tiskača i pokretnih segmenata. Pokretni segmenti vrše sužavanje odvoda, koji je formiran u I-oj fazi oblikovanja, pri čemu se na račun smanjenja poprečnog preseka dobija na visini odvoda. II-ga faza oblikovanja završava se kada tiskači i pokretni segmenti nalegnu na graničnike u alatu, tj. kada poprečni presek odvoda dobije traženi oblik - krug (sl. 2,c).

Na slici 3, prikazani su uzdužni i poprečni presek T-račve u II-oj fazi oblikovanja, tj. kada se već vrši sužavanje odvoda. Označeni su usvojeni polarno-cilindrični koordinatni sistemi za cev \$(z, \rho, \theta)\$ i odvod \$(z', \rho', \theta')\$, naznač-



slika 3



slika 4

ene su aktivne sile (sila aksijalnog sabijanja cevi  $F_1$  i sila bočnog pridržavanja  $F_2$ ), kao i glavni normalni naponi i tangencijalni naponi u pojedinim zonama.

U radu će se posmatrati slučaj, kada ose  $z$  i  $z'$  zaklapaju ugao od  $90^\circ$ , a odvod na kraju procesa oblikovanja ima kružni poprečni presek. Pritom, smatraće se da su sile  $F_1$  i  $F_2$  ravnomerno rasporedjene po čelu tiskača, odnosno po vrhu odvoda.

Analizom naponskog i deformacionog stanja, / 1/, (sl. 3), utvrđeno je da postoje četiri karakteristične zone: zona glavne cevi (I), zona prelaza cevi u odvod (II), zona odvoda (III) i zona vrha odvoda (IV). Sheme naponskog i deformacionog stanja za ove četiri karakteristične zone prikazane su na slici 4.

Uočava se, da u zoni cevi (I) vlada ravansko deformaciono stanje, dok u prelaznoj zoni (II) vlada zapreminsko i naponsko i deformaciono stanje. Izrazi za sračunavanje napona u ovim zonama dati su u literaturi / 1/ i / 2/.

I dok se naponi i deformacije u zonama I i II, i pored složenog matematičkog aparata, mogu teorijski odrediti sa veoma dobrom tačnošću, naponi i deformacije u zoni odvoda (III) mogu se odrediti samo približno. Osnovni razlog za ovo nalazi se u različitim dejstvima pokretnih segmenata i aksijalnih tiskača. Dok se pod dejstvom pokretnih segmenata vrši sužavanje odvoda (normalni naponi u tangencijalnom pravcu odvoda  $\sigma_{\theta}^3$  su naponi pritiska), dotle se pod dejstvom aksijalnih tiskača i pritiska u nestišljivom fluidu, istovremeno, vrši i uticanje materijala iz cevi (zona II) u odvod (zona III) i to po shemi deformisanja karakterističnoj za I-vu fazu deformisanja (naponi  $\sigma_{\theta}^3$  su naponi istezanja). Nemogućnost odredjivanja kolika je veličina ova dva, međusobno suprotna, uticaja uslovljava i nemogućnost tačnog odredjivanja napona i deformacija u zoni odvoda.

I u vrhu odvoda (zona IV) javljaju se ova dva suprotna uticaja. U prvoj fazi oblikovanja dominirali su naponi istezanja (zato je i predviđeno bočno pridržavanje), dok pri sužavanju odvoda dominiraju naponi pritiska.

Približno odredjivanje vrednosti napona i deformacija u zonama III i IV detaljno je obradjeno u radu / 1/.

Napominje se, da se sada, za razliku od oblikovanja T-račve bez sužavanja odvoda, javljaju i kontaktni tangencijalni naponi po omotaču odvoda, jer se u ovom slučaju vrši i plastično deformisanje odvoda. U slučaju oblikovanja T-račve bez sužavanja odvoda, deformisanje odvoda završava se u samoj početnoj fazi oblikovanja, dok se kasnije povećanje visine odvoda vrši samo na račun plastičnog deformisanja cevi, tj. uticanja materijala iz cevi u odvod.

## 3. ODREĐIVANJE PRITISKA U NESTIŠLJIVOM FLUIDU

Pritisak u fluidu mora da se nalazi u tačno određenim granicama.

Ukoliko je pritisak u nestišljivom fluidu prevelik, dolazi do razaranja vrha odvoda. Pritisak, koji dovodi do razaranja vrha odvoda,  $p_{\max}$  može se sračunati po analogiji sa hidrauličkim razvlačenjem lima u otvoru ovalnog poprečnog preseka (sl. 5,a). Na osnovu jednačina ravnoteže elementa oformljenog ispušćenja (sl. 5,b), / 3/ i / 4/:

$$\frac{p}{s} = \frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} \quad \text{i} \quad 2\sigma_1 s = \rho_2 p, \quad (1)$$

dobijaju se izrazi za sračunavanje glavnih normalnih napona u meridijanskom i tangencijalnom pravcu, respektivno:

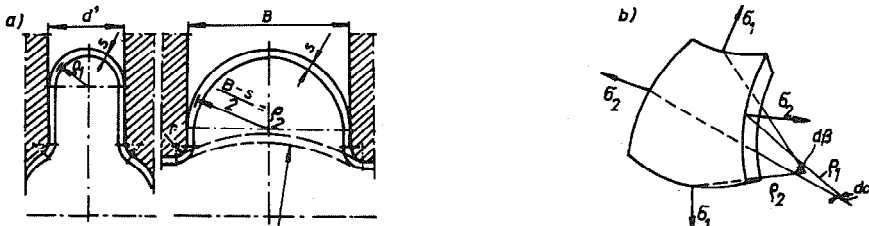
$$\sigma_1 = \frac{p \cdot \rho_2}{2s}, \quad \sigma_2 = \frac{p \cdot \rho_2}{2s} \left( 2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right). \quad (2)$$

U slučaju "pravougaonog" i eliptičnog odvoda, vrh odvoda ima oblik kupole sa dvostrukom krivinom. Radijusi krivina mogu se bitno razlikovati ( $\rho_2 = (B-s)/2 > \rho_1 = (d'-s)/2$ , sl. 5,a), čime je uslovljeno  $\sigma_2 < \sigma_1$ , tako da je za određivanje trenutka razaranja merodavan napon  $\sigma_1$ . Na osnovu prve jednačine (2) i uslova  $\sigma_1 = R_m$ , dobija se izraz za sračunavanje pritiska, koji izaziva razaranje odvoda:

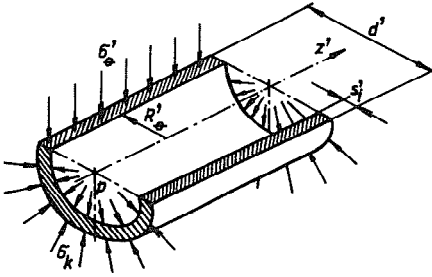
$$p_{\max} = \frac{4R_m s}{B-s}, \quad (3)$$

gde je:  $R_m$  - zatezna čvrstoća materijala,  $N/mm^2$ .

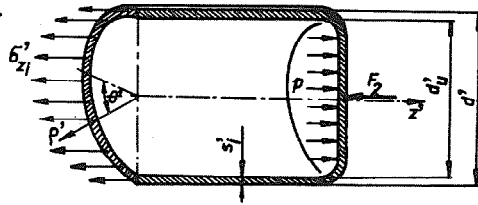
S druge strane, u slučaju nedovoljnog pritiska dobiće se odvod, čiji poprečni presek ne odgovara poprečnom preseku radijalnog otvora u alatu. Najmanji pritisak u nestišljivom fluidu  $p_{\min}$  definiše se kao pritisak potreban za oblikovanje odvoda do dimenzija otvora u alatu.



slika 5



slika 6



slika 7

Zajedničkim rešavanjem Laplace-ove jednačine ( $\sigma_\phi^s/R_\phi^s = p/s_i^s$ , kada se zid odvoda posmatra kao tankozidni cilindar, sl. 6) i približnog uslova plastičnosti ( $\sigma_\phi^s = K$ , jer se smatra da se pri proširivanju javlja linearno istezanje u tangencijalnom pravcu, / 5/), dobija se izraz za određivanje minimalnog pritiska u nestišljivom fluidu:

$$p_{\min} \geq \frac{K \cdot s_i^s}{R_\phi^s}, \quad (4)$$

gde su:  $K$  - specifični deformacioni otpor materijala,  $N/mm^2$ ,

$s_i^s$  - debljina zida odvoda, mm i

$R_\phi^s$  - najmanji radijus krivine odvoda u tangencijalnom pravcu, mm.

Za delove sa "pravougaonim" (sl. 2,a) i eliptičnim (sl. 2,b) odvodima, respektivno, jednačina (4) dobija oblik:

$$p_{\min} \geq \frac{2Ks_i^s}{d^s - s_i^s} \quad \text{i} \quad p_{\min} \geq \frac{2Ks_i^s}{B - s_i^s - \sqrt{(B - s_i^s)^2 - (d^s - s_i^s)^2}} \quad (5)$$

gde su:  $d^s$  - poprečna dimenzija "pravougaonog" odvoda, odnosno manja osa elipse, odnosno spoljašnji prečnik odvoda na kraju procrsa, mm

$B$  - uzdužna dimenzija "pravougaonog" odvoda, odnosno veća osa elipse kod eliptičnog odvoda, mm.

#### 4. SILA BOČNOG PRIDRŽAVANJA

Da bi se odredila sila bočnog pridržavanja, odvod se posmatra kao cilindrična cev sa dnom (sl. 7), unutar koje deluje hidrostatički pritisak  $p$ , a po dnu, sa spoljašnje strane, sila bočnog pridržavanja  $F_2$ , / 1/. Postavljajući jednačinu ravnoteže u pravcu  $z^s$  ose i uzimajući u obzir, da se optimalna visina odvoda (kada proces oblikovanja protekne bez razaranja, a dobija se najveća vi-

sina odvoda) dobija u slučaju  $\bar{\sigma}_z = (0,6-0,7)R_m$ , / 6/, dobija se:

$$F_2 = p \cdot \frac{\bar{\sigma}(d^3 - 2s^3)}{4} - (0,6-0,7)R_m \bar{\sigma}(d^3 - s_i^3)s_i^3, \quad (6)$$

gde je:  $s_0$  = debljina zida na vrhu odvoda, /mm/, a

$s_i = (s_0 + s_{\max})/2$  - debljina zida odvoda na kraju procesa, /mm/.

Ukoliko je pritisak, potreban za proširivanje odvoda do dimenzija radijalnog otvora u alatu ( 5 ), veći od pritiska koji izaziva razaranje vrha odvoda ( 3 ), tj.  $p_{\min} = p_{\max}$ , tada je obavezno obezbediti silu bočnog pridržavanja. Negativna vrednost za  $F_2$  po jednačini ( 6 ) označava da bočno pridržavanje nije potrebno.

#### 5. ODREĐIVANJE SILE AKSIJALNOG SABIJANJA CEVI

Sila aksijalnog sabijanja cevi  $F_1$  uslovljava da žarište plastičnih deformacija nije usko lokalizovano i da u njemu dominantan uticaj imaju naponi pritiska, pa, zbog toga, predstavlja osnovnu silu za određivanje nominalne sile preseca, na kojoj će se vršiti oblikovanje T-račve. Sila  $F_1$  na svakom od aksijalnih tiskača sračunava se kao suma komponentata, koje se troše na savladjivanje pojedinih otpora:

$$F_1 = F_{pd}^C + F_{tr}^C + F_{pf} = F_{pd}^C + F_{pd}^O + F_{tr}^C + F_{tr}^{O^*} + F_{tr}^{O^{**}} + F_{pf}, \quad (7)$$

gde su:  $F_{pd}^C$  - sila potrebna za plastično deformisanje (sabijanje) cevi, /N/,

$F_{pd}^O$  - sila potrebna za plastično deformisanje (sužavanje) odvoda, /N/,

$F_{tr}^C$  - sila potrebna za savladjivanje trenja izmedju cevi i alata, /N/,

$F_{tr}^{O^*}$  - sila potrebna za savladjivanje otpora trenja izmedju boka segmenta i alata, /N/,

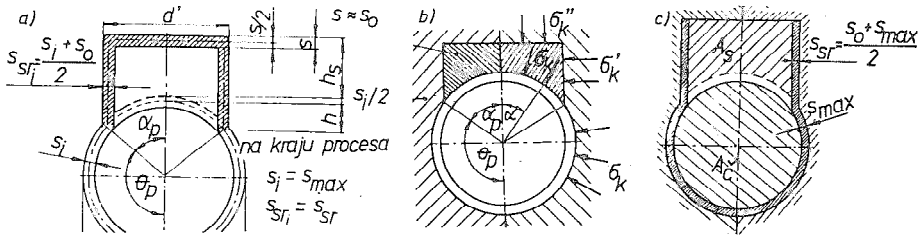
$F_{tr}^{O^{**}}$  - sila potrebna za savladjivanje otpora trenja izmedju temene površine pokretnog segmenta i alata, /N/ i

$F_{pf}$  - sila potrebna za savladjivanje otpora usled delovanja pritiska u nestišljivom fluidu, /N/.

Pre definisanja izraza za sračunavanje pojedinih komponentata, daće se odgovarajuće napomene: Plastičnim deformisanjem je, pored cevi, obuhvaćen i odvod. Maksimalna sila na aksijalnom tiskaču  $F_1$  javlja se na kraju procesa oblikovanja, pa će se i izrazi za sračunavanje komponentata dati za kraj procesa.

Sila  $F_{pd}^C$  sračunava se kao i za slučaj bez sužavanja odvoda, / 1/.

Sila  $F_{pd}^O$  ne može tačno da se sračuna, jer se zahteva poznavanje vrednosti napona  $\bar{\sigma}_0$  na odvodu, a ovaj napon je promenljiv i po visini i po obimu odvoda



slika 8

i ne može se tačno odrediti. Stoga se uvodi pretpostavka  $\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_z$ , gde je  $\bar{\sigma}_z$  normalni napon u aksijalnom pravcu cevi, a na prelazu cevi u odvod ( $\theta = \theta_p = \bar{\sigma} - \alpha_p$ , sl. 3, sl. 8,a) u preseku  $z = 0$ .

Sila  $F_{tr}$  je najsloženija za određivanje, jer se uslovi trenja menjaju u toku procesa deformisanja. U prvoj fazi deformisanja (sl. 1,a) javlja se samo trenje između cevi i alata, dok se u II-oj fazi (sl. 1,b) javlja i trenje pokretnih segmenata o alat. U završnom trenutku procesa oblikovanja, uz uvođenje pretpostavke da cev i segment predstavljaju jednu celinu, javljaju se kontaktni naponi  $\bar{\sigma}_k$  i  $\bar{\sigma}_k''$ , koji, uz primenjeno mazivo, određuju veličinu trenja (sl.8,b).

U slučaju oblikovanja sa dopunskim sužavanjem odvoda, pritisak u nestišljivom fluidu deluje, ne samo na čelo tiskača, već i na aktivnu površinu segmenta (sl. 8,c).

Komponente sila iz j-ne (7) sračunavaju se prema izrazima:

$$F_{pd}^c = \bar{\sigma} \left\{ p \cdot \frac{d^2 - (d - s_{max})^2}{4} + K \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} (d - s_{max}) s_{max} + \frac{d^2 \sqrt{3}}{12} \ln \frac{d}{d - 2s_{max}} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$F_{pd}^o = \left[ \beta s_{sr} K - \frac{p \bar{\sigma} (d^2 - 2s)^2 - 4F_2}{4\bar{\sigma} (d - s_{sr})} \right] \left[ (d - s_{max}) (1 - \cos \alpha_p) + d^2 + 2h_s + \frac{1}{2} (s_{max} - 3s) \right], \quad (9)$$

$$F_{tr}^c = \gamma u d \left[ \left( p + K \frac{3}{3} \ln \frac{d}{d - 2s_{max}} \right) \left( 1 - \frac{d^2}{2} \right) \theta_p - \frac{d^2}{2} \ln \left( \frac{21 + d \cos \theta_p}{d + d \cos \theta_p} \right) \right], \quad (10)$$

$$F_{tr}^o = \gamma u \left[ p + \frac{2s_{sr} \beta K}{d - s_{sr}} - \frac{p \bar{\sigma} (d^2 - 2s_{sr})^2 - 4F_2}{2\bar{\sigma} (d - s_{sr})} \right] \left( 1 - \frac{d^2}{2} \right) \left[ 2h_s + d (1 - \cos \alpha_p) \right], \quad (11)$$

$$F_{tr}^{o''} = \gamma u \left( p + \frac{\sqrt{3}}{3} K \cdot \ln \frac{d}{d - 2s_{max}} \right) \left( 1 - \frac{d^2}{2} \right) d^2, \quad (12)$$

$$F_{pf} = p \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{4} (d - 2s_{max})^2 + (d^2 - 2s_{sr}) \left[ \frac{d}{2} (1 - \cos \alpha_p) + h_s \right] - \frac{d^2 \bar{\sigma} \alpha_p}{4 \cdot 180} - k_p \cos \alpha_p \right\}, \quad (13)$$

gde su:  $d, d'$  - spoljašnji prečnik cevi, tj. odyoda (respektivno), /mm/,  
 $l$  - polovina dužine glavne cevi na kraju procesa (sl. 1,c), /mm/,  
 $\beta$  - bezdimenzionalni koeficijent,  
 $\gamma u$  - koeficijent trenja,

$s_{\max}, s_{sr}$  - maksimalna debljina zida cevi, tj. srednja debljina zida odvoda (respektivno), /mm/,

$h_s$  - visina pokretnog segmenta (sl. 8,a), /mm/,

$\alpha_p = \bar{\alpha} - \alpha_p$  - ugao na prelazu cevi u odvod (sl. 3, sl. 8,a), /°/

$k_p = \sin \alpha_p = d'/d$  - koeficijent prelaza (sl. 8,a).

## 6. ZAKLJUČAK

Pritisak u nestišljivom fluidu mora da bude u tačno odredjenim granicama, jer se na osnovu ovih vrednosti bira snaga hidrauličkog agregata.

Sila aksijalnog sabijanja najveća je na kraju procesa oblikovanja i prema toj vrednosti vrši se izbor prese i dimenzionisanje alata.

Sile trenja su velike, pa treba primeniti što god je moguće kvalitetnije sredstvo za podmazivanje.

## R e f e r e n c e

- / 1/ Rančić B., Analiza naponskog i deformacionog stanja pri proširivanju cevi nestišljivim fluidom sa definisanjem analitičkih zavisnosti za pritisak fluida i aksijalnu silu sabijanja cevi, magistarska teza, Univerzitet u Nišu - Mašinski fakultet, Niš, 1987.
- / 2/ Rančić B., Stoiljković V., Naponsko-deformaciono stanje na delovima tipa T-račve, dobijenim proširivanjem nestišljivim fluidom na hladno, Zbornik radova sa 21. SPSJ, Opatija, 1987.
- / 3/ Stoiljković V., Teorija obrade deformisanjem, Univerzitet u Nišu - Mašinski fakultet, Niš, 1984.
- / 4/ Averkiev A.J., Metodi ocenki stampuemosti listovogo metalla, Mašinstroenie, Moskva, 1985.
- / 5/ AN Beloruskoj SSR, Impulsne metodi obrabotki materialov, Nauka i tehnika, Minsk, 1979.
- / 6/ Bogojavlenskii K.N., Serjakov E.I., Izgotovlenie složnih polih detalei, Mašinstroenie, Leningrad, 1979.

B. Rančić

## DETERMINATION OF PRESS AND FORCES FOR OIL FORMING PROCESS OF T-FORK WITH ADDITIONAL BULGE NARROWING

### - S u m m a r y -

Used kind of forming process, makes possible getting of maximum height of bulge.

In this work are shortly described shemes of stress-strain state, and there are also given equations for calculating of fluid press, axial force  $F_1$  and radial force  $F_2$ .

Knowledge of press and forces is used for adequate selection of equipment: the hydraulic press and the hydraulic aggregate, and also for adequate tool construction.

S. Hasanbegović\*

ANALIZA TANGENCIJALNIH NAPONA  
PROCESA IZVLADENJA ELIPTIČNIH TIJELA

## 1. UVOD

Analizu pojave tangencijalnog napona, u procesu izvlačenja nesimetričnih (nerotacionih) sudova tankih zidova, daje E.A. Popov [2.].

U radu se predstavljene rezultati pomenute analize, na primjerima izvlačenja eliptičnih tijela, u eliptičnom koordinatnom sistemu.

Dati su dijagrami tangencijalnih napona  $\tau_{\varphi\varphi}$  i  $\tau_{\varphi z}$  [1.], u ravnima određenim eliptičnim koordinatama, za područje odnosa poluosa elipsi

$$\frac{b}{a} = (0.1; 0.9991).$$

## 2. OBJASNJENJE POJAVE TANGENCIJALNOG NAPONA

Analiza pomjeranja elemenata 1 i 2 (Sl.1) u uslovima ravninskog deformacionog stanja, na konstantnom rastojanju od konture prstena za izvlačenje  $l$ , u zavisnosti od veličine  $dh$  (koja je postojna na konturi i jednaka hodu izvlakača), pri procesu izvlačenja nerotacionih sudova tankih zidova, daje [2.]

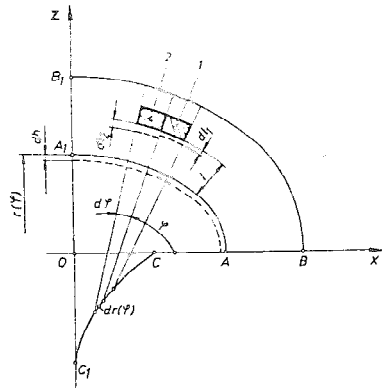
$$\left. \begin{aligned} dl_1 &= \frac{r(\varphi)}{r(\varphi)+l} dh \\ dl_2 &= \frac{r(\varphi)+dr(\varphi)}{r(\varphi)+dr(\varphi)+l} dh. \end{aligned} \right\} (1)$$

Zbog različitih pomjeranja elemenata 1 i 2 (Sl.1) pojavljuje se tangencijalna deformacija [2.]

$$\gamma = \frac{1}{(r(\varphi)+l)^2} \frac{dr(\varphi)}{r(\varphi)d\varphi} dh. \quad (2)$$

\* / Mr Suad Hasanbegović, dipl. mas. ing., SOUR "FAMOS",  
RO Fabrika transmisija, ul. Tvornicka 98, Hrasnica - Sarajevo





SI.1 POMJERANJE ELEMENATA

Velicina cirkularne deformacije, zanemarujući utjecaj deformacije smicanja, određuje se približno izrazom [2.]

$$\epsilon_v = \frac{dl}{r(\varphi) + l} = \frac{r(\varphi)}{(r(\varphi) + l)^2} dl. \quad (3)$$

Na osnovu izraza (2) i (3), koristeći relacije: deformacione teorije plastičnosti (veza između napona i deformacija) i uslov plastičnog tečenja (po hipotezi najveće deformacione energije utrošene na promjenu oblika), dobivena je vrijednost tangencijalnog napona [2.]

$$\tau_{uv} = k_s \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \left( \frac{r(\varphi)}{r(\varphi) dl} \right)^2}} \quad (4)$$

gdje je :

$$\frac{k}{\sqrt{3}} = \frac{k_r}{2} = k_s, \quad k - \text{specifični deformacioni otpor,}$$

$r(\varphi)$ ,  $dr(\varphi)$  i  $d\varphi$  - radijus krivine konture,  
diferencijali radijusa  
i ugla i

$l$  - rastojanje od konture.

### 3. TANGENCIJALNI NAPONI U RAVNIMA ELIPTICNOG KUORDINATNOG SISTEMA

Radius zakrivljenosti elipse, zadane u parametarskom obliku, dat je izrazom [5.]

$$r = r(u) = c \frac{(ch^2 u \sin^2 v + sh^2 u \cos^2 v)^{3/2}}{ch u \ sh u}. \quad (5)$$

deriviranje izraza (5) daje

$$dr(v) = \frac{c}{2} \frac{c}{ch u_1 \ sh u_1} (ch^2 u \ sin^2 v + sh^2 u \ cos^2 v)^{1/2} \ sin 2v \ dv. \quad (6)$$

Element luka  $ds = r(u) du$  duž elipse u (konture prstena za izvlačenja) izražen uglom elipse (koordinatom  $v$  eliptičnog koordinatnog sistema) je dat izrazom (7.)

$$ds = \left[ \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial v} \right)^2 \right]^{1/2} dv = c (ch^2 u \ sin^2 v + sh^2 u \ cos^2 v)^{1/2} dv. \quad (7)$$

Pretpostavimo da se krive paralelne konturi mogu aproksimirati konfokalnim elipsama, a njihova rastojanja od konture  $l$  funkcijom (1.)

$$l = [(X-x)^2 + (Z-z)^2]^{1/2} = c [(chu - ch u_1)^2 \cos^2 v + (shu - sh u_1)^2 \sin^2 v]^{1/2} \quad (8)$$

Uvrštavanjem izraza (5), (6), (7) i (8) u jednačinu (4) daje

$$\tau_{uv} = k_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4}{9} \frac{f_1(u, v)}{f_2(u_1, u, v) f_3(v)}}} \quad (9)$$

vrijednost tangencijalnog napona koji djeluje po pravcima osa eliptičnog koordinatnog sistema (1.).

Vrijednosti funkcija u jednačini (9) su :

$$\begin{aligned} f_1(u_1, v) &= (ch^2 u_1 \ sin^2 v + sh^2 u_1 \ cos^2 v)^3, \\ f_2(u_1, u, v) &= (chu - ch u_1)^2 \cos^2 v + (shu - sh u_1)^2 \sin^2 v \text{ i} \\ f_3(v) &= (\sin v \cos v)^2. \end{aligned}$$

Poznavajući funkcionalnu vrijednost tangencijalnog napona  $\tau_{uv}$  (9) moguće je transformacionim obrascima, preko Eulerove formule u uslovim ravninskog deformacionog stanja, odrediti funkcionalnu vrijednost tangencijalnog napona u pravcu osa Dekartovog koordinatnog sistema  $\tau_{xz}$  (1.).

$$\tau_{xz} = \frac{1}{f_4(u, v)} [f_7(k, \tau_{uv}) f_5(u, v) + \tau_{uv} f_6(u, v)] \quad (10)$$

gdje je :

$$\begin{aligned} f_4(u, v) &= 1 + tg^2 v \ ct h^2 u, \\ f_5(u, v) &= tg v \ ct hu, \\ f_6(u, v) &= 1 - tg^2 v \ ct h^2 u \text{ i} \\ f_7(k, \tau_{uv}) &= (k^2 - 4\tau_{uv}^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

#### 4. DIJAGRAMI TANGENCIJALNIH NAPONA

Kako je eliptični sistem koordinata simetričan, u odnosu na ose  $(x, z)$ , dovoljno je posmatrati prvi kvadrant.

Varijable  $u$  i  $v$  (koordinate eliptičnog sistema), u prvom kvadrantu, mogu poprimiti vrijednosti u dijapazonu  $v \in [0; \pi/2]$  i  $u \in [0; \alpha]$ .

Funkcijom preslikavanja

$$Z = x + iz = c \operatorname{ch} W = c \operatorname{ch}(u + iv) = c (\operatorname{ch} u \operatorname{cos} v + i \operatorname{sh} u \operatorname{sin} v) \quad (11)$$

se četvrtina ravni  $W$  preslikava u četvrtinu ravni  $Z$ .

Za konačnu vrijednost konstante  $c$ , pod uslovom da odnos poluosa elipsi može poprimiti vrijednosti iz dijapazona  $b/a \in [0.1; 0.999]$ , područja definisanja varijabli su :

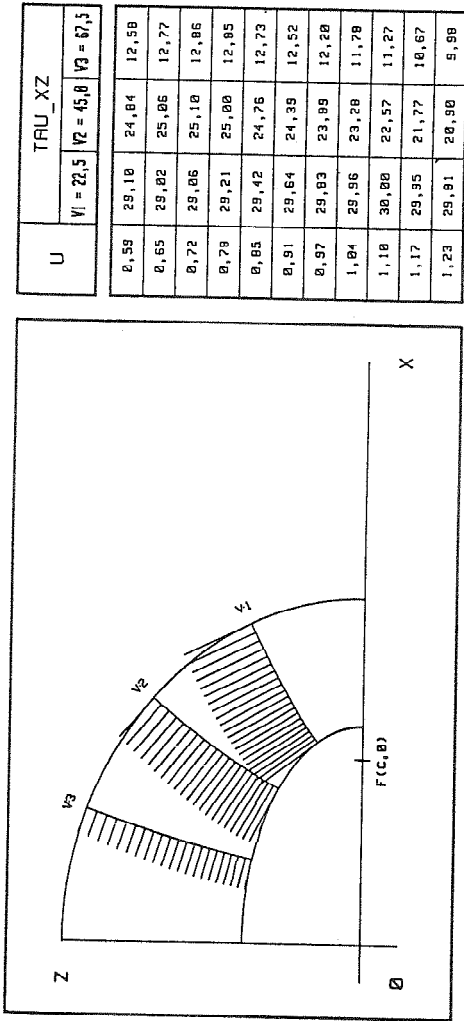
$$\left. \begin{aligned} u \in [0.1; 3.897] ; v \in [0; \pi/2] \\ x \in [0; c \operatorname{ch} u_{\max} \operatorname{cos} v_{\min}] ; z \in [0; c \operatorname{sh} u_{\max} \operatorname{sin} v_{\max}] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Za crtanje grafova funkcija  $\tau_{uv}$  (9) i  $\tau_{xz}$  (10) usvojene su vrijednosti : reduciranog specifičnog deformacionog otpora  $k_r = 60$ , fokusne udaljenosti elipsi odnosno hiperbola  $c = 20$  i dozvoljenog stepena preoblikovanja (odnos malih poluosa elipsi)  $K = 2.5$ .

Tako je dobiveno šest područja za crtanje dijagrama tangencijalnih napona. Za svako od ovih područja, pomoću kompjutera, su duž elipsi ( $u = \text{konst.}$ ) odnosno hiperbola ( $v = \text{konst.}$ ) nacrtani dijagrami napona  $\tau_{uv}$  i  $\tau_{xz}$  [1.] čija ilustracija je data na Sl.2 i Sl.3.

Iz dijagrama je evidentno da vrijednosti tangencijalnog napona  $\tau_{xz}$  vrlo malo zavise od koordinate  $u$ . Zanemarivanjem utjecaja koordinate  $v$  dobiva se da mu je vrijednost određena vrijednošću na konturi prstena za izvlačenje

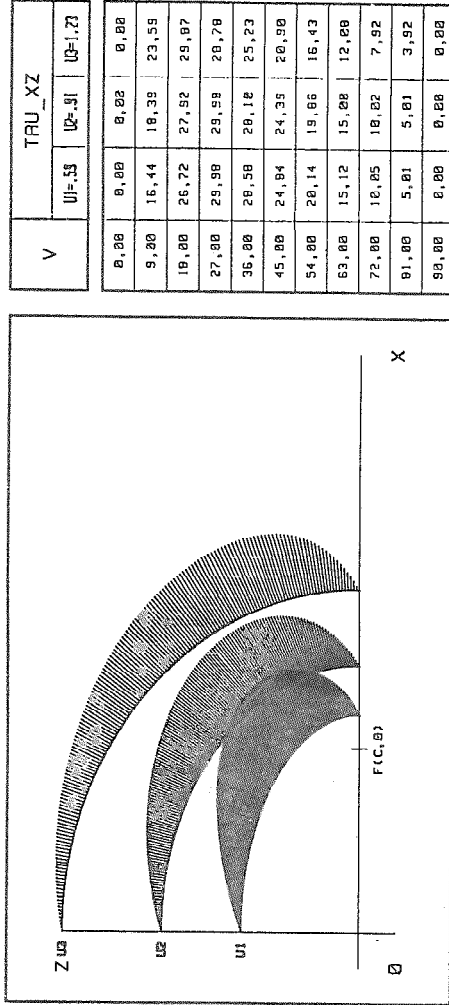
$$\tau_{xz} = k_s \operatorname{sin} 2v. \quad (13)$$



MAKSIMUMI	
1,10	30,00
0,72	25,10
0,75	12,87
FI	
	27,34
	58,36
	75,25

DIJAGRAM TANGENCIJALNIH  
 NAPONA TAU\_XZ  
 ( po hiperbolama )

Sl. 2



V	TRU_XZ		
	U1=53	U2=91	U3=123
0,00	0,00	0,00	0,00
9,00	16,44	18,39	23,59
19,00	26,72	27,92	29,07
27,00	29,98	29,59	26,78
36,00	26,58	20,12	25,23
45,00	24,04	24,35	20,90
54,00	20,14	19,66	16,43
63,00	15,12	15,08	12,00
72,00	10,05	10,02	7,02
81,00	5,01	5,01	3,02
90,00	0,00	0,00	0,00

MAKSUMUMI	20,13	30,00	
	25,80		30,02
FI	19,69		30,00
		45,21	33,92
			23,01

DIJAGRAM TANGENCIJALNIH  
 NAPONA TRU\_XZ  
 ( po elipsama )

SI. 3

## 5. ZAKLJUČAK

Analizom tangencijalnih napona  $\tau_{\theta\theta}$  i  $\tau_{\theta r}$ , u procesu izvlačenja eliptičnih tijela, utvrđeno je : da kontura prstena za izvlačenje i njoj paralelne krive linije predstavljaju glavne pravce procesa. Normale na konturnu krivu, koja su tangente njene evolute, su također glavni pravci procesa.

Do istog rezultata se može doći smatrajući liniju  $\overline{AA_1}$  (Sl.1) glatkom krivom. U tom slučaju mogu se u jednačini (1) zanemariti umnošci diferencijala, kao male veličine višeg reda, a kao posljedica je jednakost diferencijalnih veličina ( $dl_1=dl_2$ ). Zbog toga se zaključak, dat na osnovu analize tangencijalnih napona u procesu izvlačenja eliptičnih tijela, može generalizirati na sva tijela koja u poprečnom presjeku imaju neku od glatkih ravničkih krivi sa centrom.

## Reference

- [1.] Hasanbegović S.: Analiza naponskog stanja procesa izvlačenja eliptičnih tijela. Dodatak 2, Tangencijalni naponi. Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 1987. Magistarski rad.
- [2.] Popov E.A.: Osnovi teoriji listivoj šampovki. Mašinstroenije Moskva, 1977.
- [3.] Musafia B.: Primjenjena teorija plastičnosti, I dio. Univerzitet u Sarajevu, 1973.
- [4.] Musafia B.: Plastomehanika. Svezak 3, Matematska teorija plastičnosti. Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 1977.
- [5.] Blanuša D.: Viša matematika, I dio, drugi svezak. Tehnička knjiga, Zagreb, 1965.
- [6.] Kurepa S.: Matematička analiza. Treći dio. Funkcije više varijabli. Tehnička knjiga. Zagreb, 1979.
- [7.] Timošenko S., Gudier J.N.: Teorija elastičnosti - prevod. Građevinska knjiga. Beograd, 1962.

S. Hasanbegović

THE ANALYSIS OF TANGENTIAL TENSION IN THE PROCESS  
DEEP-DRAWING ELLIPTICAL CUPS

S u m m a r y

As starting point for work, the results of analyzed occurrence tangential tension in the process deep-drawing non-axis symmetry (non-rotating) thin wall cups by E. A. Popov are used. The results of mentioned analysis are presented in the examples of the deep-drawing elliptical cups. It is found out that the curves which are parallel with ring contour for drawing are the main directions of proces, in all cases when the contour is level smooth curve with center.

---

## 22 ЈУГОСЛОВЕНСКО СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИЊСТВО

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

---

Sreten Urošević<sup>x)</sup>

### PRILOG ISTRAŽIVANJU EKONOMIČNOSTI TIP PROCESA

#### 1. Uvodne napomene

Može se već sada pouzdano tvrditi da procesi toplog izostatičkog presovanja (procesu TIP) ulaze u proizvodno mašinstvo na široka vrata. Vreme eksperimentisanja je završeno tako da procesi TIP sve više nalaze svoje mesto u industrijskoj proizvodnji. Ovi procesi su u proizvodnom mašinstvu značajni bar iz sledećih razloga:

- Proizvodnji visokokvalitetnih keramičko kompozitnih sečiva (dakle, reznih ali i drugih alata);
- Proizvodnji (obradi) visokokvalitetnih komponenti od raznih vrsta keramičkokompozitnih materijala kao i poboljšanje kvaliteta mnogih komponenti proizvoda koji se izrađuju iz tzv. klasičnih materijala;
- Projektovanje i proizvodnja opreme za potrebe procesa toplog izostatičkog presovanja.

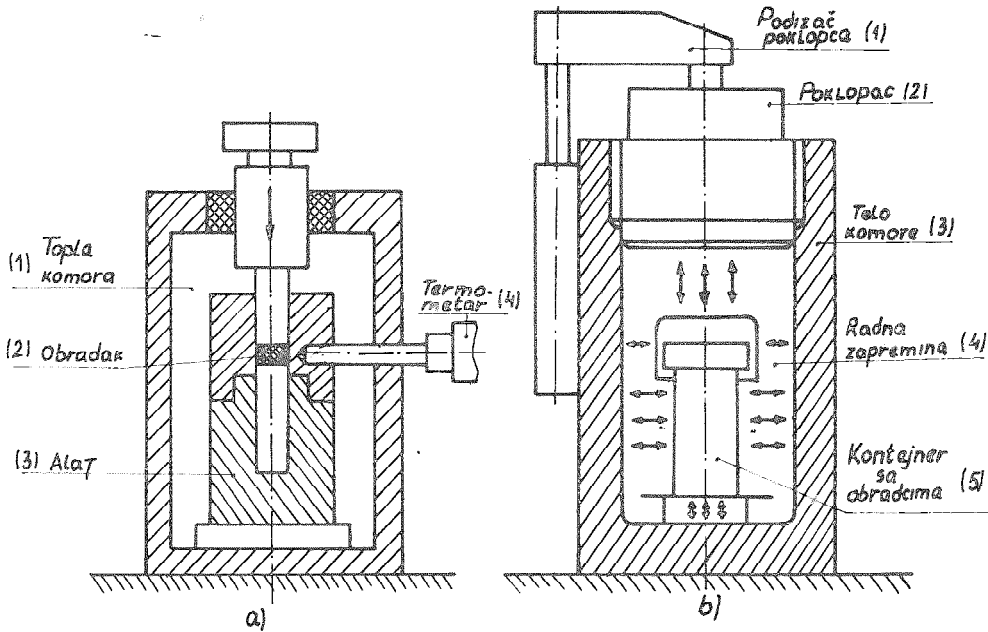
Razvoj procesa TIP je uslovljen potrebom osvajanja tehnoekonomske prihvatljivih tehnologija sinterovanja pod visokim pritiscima i temperaturama raznih keramičkokompozitnih materijala kao i poboljšanjem kvaliteta nekih komponenti mašinskih konstrukcija izrađenih od klasičnih materijala. Ova potreba je naročito značajna u razvoju tehnologija sinterovanja pod pritiskom obradaka složenih oblika (delovi, koji pored složenih oblika imaju uz to još i relativno tanke zidove, razne šupljine i sl.). Pri tome je osnovni cilj procesa TIP da se postignu maksimalno moguće gustine materijala obradaka (iznad 99% teorijske gustine - TG) i da tokom sinterovanja ne dodje do znatnog rasta njegovog zrna.

Bitne karakteristike kao i mogućnosti procesa TIP se uočavaju preko komparacije dve paralelne tehnologije koje se mogu u određenim slu

<sup>x)</sup> Dr. Sreten Urošević, dipl. ing., red. profesor Tehničkog fakulteta Univerziteta "Svetozar Marković", Čačak, Borisa Kidriča bb



čajejima, kada to oblici obradaka dozvoljavaju, primeniti tokom sintero-  
vanja pod pritiskom - slika 1.



Sli. 1

Prema slici 1a proces toplog sintero-  
vanja se izvodi presovanjem ob-  
radaka (2) u klasičnom alatu (3), pri čemu je alat zagrejan. Greja-  
nje alata se ostvaruje njegovim postavljanjem u neutralnu atmosferu  
zagrejane komore (1).

Karakteristika ovog procesa je u dejstvu sile presovanja u jednom  
pravcu te da bi se postigle povoljne strukture materijala obradaka  
u svim pravcima, presovanje se odvija u prisustvu znatnih količina  
aditiva radi stvaranja tečnih faza u toku sintero-  
vanja. Očigledno je da je ovakav proces spor. Osim toga, alati su kratkog veka i uz  
to su veoma skupi. Zbog toga, ovakvi procesi toplog presovanja i si-  
ntero-  
vanja su prihvatljivi za proizvodnju manjih serija delova jed-  
nostavnijih oblika.

Proces TIP je prikazan šematski na slici 1b. On se realizuje tako

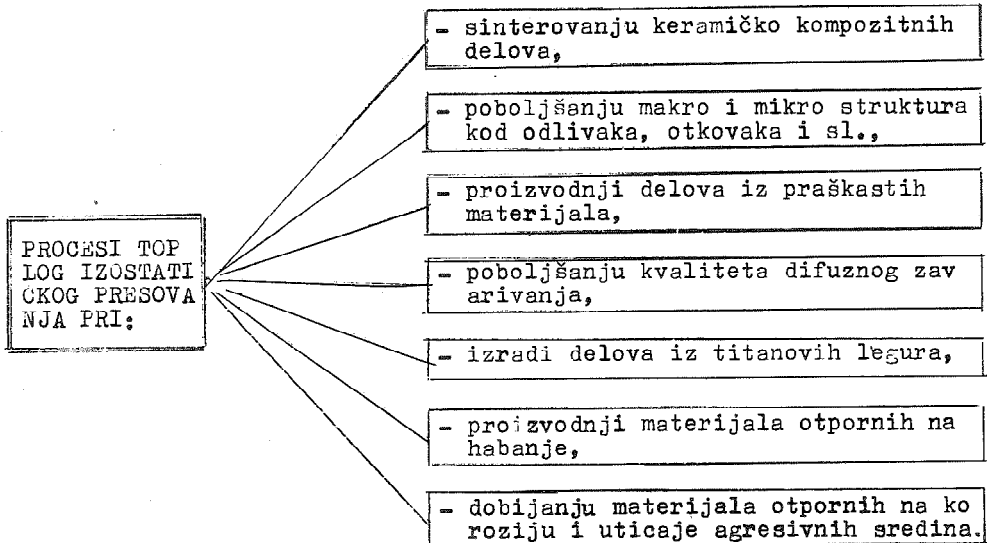
što se obradci slobodno pakuju u određene nosače - kontejnere (5), a ovi se zatim postavljaju u radnu komoru (4). Nakon zatvaranja, u komoru se dovodi radni fluid (obično gas argon) koji se u toku procesa zagreva do projektovane temperature i pri tome održava još i po potreban pritisak. Tehnološki posmatrano, bitna karakteristika procesa TIP je u prostornom rasporedu sila presovanja (ravnomerno raspoređeno dejstvo pritiska na obradak iz svih pravaca u prostoru) te se sa izborom pritiska  $p/Pa$  i temperature  $t/^\circ C$  kao osnovnih parametara procesa postižu ciljevi sinterovanja - gustina materijala obratka bliska teorijskoj gustini (TG) i povoljna struktura njegovog zrna. Međutim, ništa manje nije značajna i proizvodna karakteristika procesa TIP. Naime, prema slici 1b, teorijski je moguće celu radnu zapreminu komore prese ispuniti obradcima. To omogućuje, za razliku od šeme presovanja prema slici 1a, da se istovremeno sinteruje (obradjuje) relativno velika količina materijala. Prema tome, s gledišta proizvodnosti, proces TIP pokazuje visoke kvalitativne parametre.

Način dejstva sile na obradak u procesu TIP omogućuje njegovu primenu i pri sinterovanju (obradi) veoma složenih obradaka. Osim toga, procesi TIP se sve više primenjuju u obradi nekih visokokvalitetnih proizvoda što nagoveštava brzo širenje njihove aplikacije u industriji (poboljšanje makro i mikrostruktura osnovnih materijala od kojih se izradjuju dinamički veoma napregnuti delovi, poboljšanje procesa sinterovanja delova izradjenih iz praškastih materijala i sl.). Smerove naznačenog trenda razvoja procesa TIP ilustruje delimično šema njihove aplikacije - slika 2.

Razvoj i primena u industriji procesa TIP ukazuje na potrebu da se domaća industrija angažuje u rešavanju bar sledeće dve grupe razvojnih zadataka. To su:

- Istraživanje mogućih područja primene;
- Istraživanje puteva za tehnoekonomsku optimizaciju razvoja i primene procesa TIP.

U vezi sa drugom grupom zadataka, daju se u narednom tekstu neka problemska razmatranja, pri čemu se imaju u vidu relativno visoka investiciona ulaganja u opremu za procese TIP te u vezi s njima i potrebu da se instalisani kapaciteti intenzivno koriste.



Sl. 2

## 2. Pristup razmatranju optimizacije tehnološke organizacije procesa TIP

Procese TIP karakterišu njegovi parametri  $p$  (pritisak),  $t$  (temperatura) i  $T$  (vreme). Ovim parametrima treba dodati i zapreminu komore (autoklava) koja karakteriše opšti kapacitet uređaja za TIP.

Organizacija procesa TIP u konkretnim uslovima znači stvaranje onih pretpostavki za njihovu optimalnu eksploataciju koji će kao rezultat imati troškove od, naprimer, cc 0,5\$/kg. Verovatno je da će se ovaj nivo troškova u toku daljeg razvoja procesa TIP snižavati te je neophodno sagledati uticaje nekih parametara na ukupno cenu koštanja procesa TIP.

Investicioni (fiksni) troškovi kod procesa TIP bez sumnje su dominantni na cenu obrade. Mada je teško doći do pouzdanih podataka o zakonitosti kretanja nivoa cena opreme, nju ilustruju sledeći podaci:

- Laboratorijska oprema za TIP sa komorom prečnika  $d = 100\text{mm}$  i visine komore  $h = 150\text{mm}$ , za rad na temperaturi  $t = 2000^{\circ}\text{C}$  i pritisku  $p = 200\text{MPa}$ , košta cc 200 - 300.000\$ (bez troškova nabavke, instalisanja, obuke kadrova, tj. pripreme za rad);

- Oprema za TIP industrijskih razmera ( $d = 1000\text{mm}$ ,  $h = 1500\text{mm}$ ) košta cc 2 - 3.000.000\$.

Ako se analiziraju cene za niz medjuveličina (mada one nisu još pouzdane), proizilazi da sa porastom parametra  $d/\text{mm}$  tj. prečnika komore, cena opreme za TIP raste po zakonitosti koja se može preslikati približno krivom drugog reda. Medjutim, kapacitet uređjaja za TIP zavisi od:

- kapaciteta za jedan ciklus (zavisi uglavnom od zapremine komore) obrade, i
- broju ciklusa koji se mogu realizovati u odredjenom vremenskom periodu, naprimer u toku jedne godine dana.

Broj ciklusa u toku jedne godine zavisi od organizacionih uslova i tehničke opremljenosti uređjaja za TIP. Kreće se od 160 - 300 i više ciklusa godišnje. Broj ciklusa godišnje se može povećati daljim poboljšanjem uređjaja za TIP (naprimer, rad sa više rezervoara za radni fluid - tečni tj. gasoviti argon).

Glavni parametri kojima se definiše ekonomičnost procesa TIP su:

- Kapacitet instalisanog uređjaja za TIP;
- Investicionih troškova za nabavku i instalisanje uređjaja za TIP;
- Troškova pripreme za TIP kao i sami troškovi procesa TIP.

Ako se naznačeni troškovi svedu na definisani poslovni period - tj. jednu godinu, onda se mogu oblikovati sledeće relacije:

$$Q = K \cdot L^3 \text{ /kg/} \quad (1)$$

gde je  $Q$  kapacitet,  $K$  koeficijent zavisen od tipa uređjaja, a  $L$  re prezentuje karakterističnu dimenziju radne komore uređjaja za TIP - naprimer prečnik  $d/\text{mm}$  kojem obično odgovara visina komore  $h = kd$ ;

$$T = a \cdot L + b \cdot L^{n_1} + c \cdot L^{n_2} \text{ /din/} \quad (2)$$

gde je  $T/\text{din/}$  godišnji iznos svih troškova datog procesa TIP,  $a$  - faktor fiksnih troškova u vezi sa investiranjem u građevinske objekte i instalacije pri izgradnji pogona za TIP,  $b$  - faktor fiksnih troškova čiji su izvori investicije u nabavku uređjaja za TIP i  $c$  - faktor troškova u vezi sa pripremom i održavanjem u pogonu uređjaja za TIP,  $n_1$  i  $n_2$  su konstante za odredjeni uređjaj čije su približne numeričke vrednosti  $n_1 = 1,8 - 2,2$ , a  $n_2 = 1,2 - 1,5$ .

Polazeći od izraza (1) i (2) definišu se još sledeći pokazatelji:

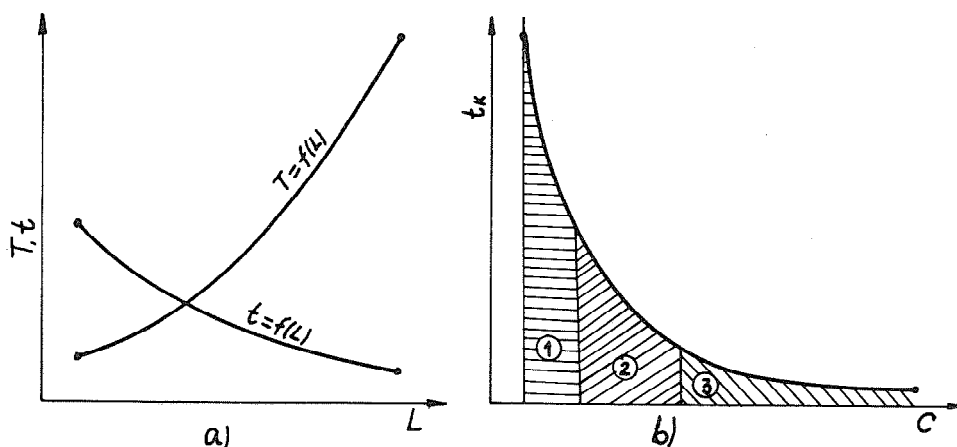
$$t = \frac{T}{Q} = \frac{a}{K \cdot L^2} + \frac{b}{K \cdot L^{2-n_1}} + \frac{C}{K \cdot L^{2-n_2}} = A + B + C \quad (3)$$

odnosno,

$$t_k = \frac{A + B}{C} \quad (4)$$

gde je  $t$  specifični troškovi obrade po jedinici proizvoda (usvoje noj jedinici za merenje količine obradjenog materijala u procesu TIP) a  $t_k$  - tehnološka karakteristika proizvodne cene.

Ako se numeričke vrednosti preslikane izrazima (2) i (4) ilustruju, onda se dobijaju oblici dijagrama prema slikama 3a i 3b.



Sl. 3

### 3. Zaključak

Visok nivo investicionih ulaganja u opremu za TIP dominantno utiču na cenu procesa TIP u toku njihove eksploatacije. Uz pomoć ilustrovanog prikaza zakonitosti promena vrednosti za  $T$ ,  $t$ ,  $t_k$  na slici 3 može se zaključiti:

1. Ukupni troškovi procesa TIP rastu po zakonitosti krive  $n$ -tog reda ( $n = 1,2 - 2,2$ ) sa porastom kapaciteta instalisanog uređaja

za TIP - kriva  $T = f(L)$  na slici 3a;

2. Porast kapaciteta instalisanog uređaja za TIP sledi zakon krive 3 - čeg reda ( $Q = K \cdot L^3$ ) te jedinični troškovi  $t = T/Q$  opadaju sa porastom parametra  $L$  - kriva  $t = f(L)$  na slici 3a.
3. Ekonomičnost procesa TIP se temelji na maksimizaciji korišćenja instalisanih kapaciteta, pri čemu se teži minimizaciji vrednosti za  $t_k$ . Tako prema dijagramu na slici 3b definišu se tri područja intenziteta korišćenja. To su:
  - Područje 1 - odgovara apsolutno niskom intenzitetu korišćenja i može se tolerisati samo u laboratorijskim istraživa njima;
  - Područje 2 - odgovara nedopustivo niskom intenzitetu korišćenja u proizvodnim uslovima;
  - Područje 3 - odgovara optimalnom intenzitetu korišćenja u proiz vodnim uslovima.
4. Prednji zaključci upućuju na imperativ da se uvođenje procesa TIP u domaćoj industriji realizuje kroz izgradnju zajedničkih specijalizovanih pogona, obzirom da takav koncept tehnološke or ganizacije procesa TIP obezbedjuje minimizaciju vrednosti fakto ra  $t$ , odnosno  $t_k$ .

#### 4. L i t e r a t u r a

- /1/ A.Miyamoto, Hot Isostatic Pressing and Application for High Per formance Ceramics, Taikabutsu Overseas, Vol.6., No.1, p.39
- /2/ P.J.James, Isostatic Pressing Technology, Applied Science Publi shers, London and New York (1983)
- /3/ V.Šolaja sa grupom istraživača, Godišnji izveštaj o rezultatima istraživanja na makroprojektu T.102 - Razvoj opreme i tehnologije obrade metala rezanjem, RZNR SRS, Beograd (1988)

Sreten Urošević

BEITRAG DER ERFORSCHUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DER HIP PROZESSE

- Zusammenfassung -

Des allgemeinen technischwirtschaftlichen Probleme bei der Entwick lung und der Anwendung der Heissisostatischen Pressen (HIP - Verfah ren), werden in Artikel dargestellt und kurz beschrieben. Um die mate matischen Modellierung der Kostengesetzmässigkeit dieses Prozesses, eine matematischen Modell analysiert und vorgeschlagen wird.



V. Marinković \*

ANALIZA MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA PROCESA  
REDUCIRANJA U VIŠE OPERACIJA

1. UVOD

Proces reduciranja, kao specijalni vid istosmernog istiskivanja u alatu (matrici) bez cilindričnog dela (kontejnera), primenjuje se za obradu "vitkih" elemenata ( $h_0/d_0 \gg 1$ ).

Primena klasičnog postupka istosmernog istiskivanja u ovakvim slučajevima je veoma retka, zbog ekstremnih gubitaka na trenje, kako za vreme trajanja samog procesa, tako i pri izbacivanju komada (pri obradi u više operacija), s jedne strane, i upotrebe mašina velike nazivne sile i velikih radnih hodova i radnih prostora za smeštaj alata, s druge strane.

Reduciranje se može realizovati u jednoj ili više operacija (stupnjeva). Kod izrade stupnjevutih elemenata reduciranjem razlikuju se postupci jednostranog i dvostranog reduciranja. Dvostrano reduciranje je produktivnije, jer se obrada oba kraja priprema vrši za jedan hod mašine (prese), ali je pri tome neophodno koristiti prese višestrukog dejstva.

Teorijski i tehnološki problem reduciranja u jednoj operaciji je dovoljno istražen i opisan u literaturi /1/, /2/, /3/, /4/. Pri tome, treba imati u vidu da se postupci "hidrauličnog" istiskivanja mogu tretirati kao reduciranje, jer ne postoji direktni kontakt između obratka i cilindričnog dela alata (kontejnera) /5/, /6/.

Postupak reduciranja u više operacija je sa aspekta neposredne primene u praksi, takodje, dovoljno istražen /7/, /4/, ali je nedovoljno teorijski proučen, što je upravo cilj ovog priloga.

---

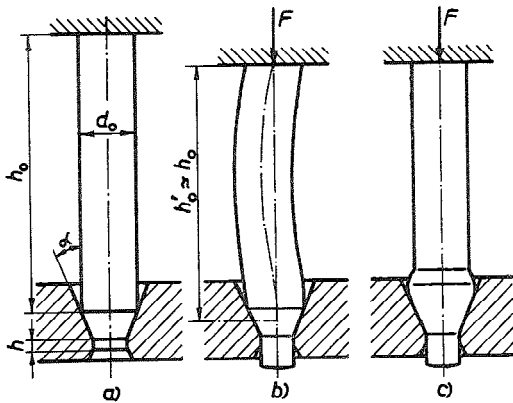
\*) dr Velibor Marinković, dipl. ing., vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu, Ul. Beogradska 14



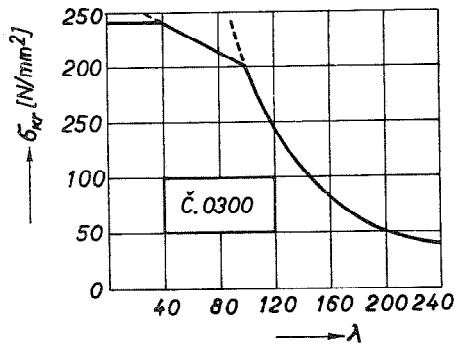
## 2. USLOVI STABILNOSTI PROCESA REDUCIRANJA

Pod određenim uslovima proces reduciranja može postati nestabilan, što uzrokuje ograničenje njegove šire primene u praksi. Nestabilnost procesa reduciranja izražava se pojavama:

- izvijanja pripremk (Sl.1b),
- zadebljanjem obratka na ulazu materijala u zonu plastičnih deformacija (Sl.1c).



Sl. 1



Sl. 2

Pojavu zadebljanja treba izbeći, jer se zadebljanje ("nabor") materijala sa jednog kraja "premešta" na drugi kraj pripremk, te izaziva valovitost obradjene površine, a može biti i sekundarni uzrok izvijanja pripremk.

Da bi se neželjena pojava zadebljanja sprečila, mora biti zadovoljen sledeći uslov:

$$p = F/A_0 \leq K_0 \cdot \sigma_v \quad (1)$$

Kako se reduciranje primenjuje pri obradi "vitkih" elemenata, izvijanje obratka je česta pojava, čime se proces ne može realizovati do kraja.

Ako se zanemari uticaj nepravilnog oblika i netačnosti postavljanja pripremk, do izvijanja neće doći ako je ispunjen sledeći uslov /8/:

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \leq \sigma_p \quad (2)$$

gde su:  $\sigma_{kr}$  - kritični napon pritiska,

$E$  - modul elastičnosti materijala pripremk,

$\sigma_p$  - napon na granici proporcionalnosti,  
 $\lambda$  - Vitkost štapa (priprema).

Vitkost štapa (priprema), početnih dimenzija  $h_0 \times d_0$ , definiše se sledećim izrazom /8/:

$$\lambda = v \cdot h_0 / l = v \cdot h_0 \sqrt{I/A_0} = 4v(h_0/d_0) \quad (3)$$

gde je:  $v$  - koeficijent redukovane dužine, koji zavisi od načina učvršćenja štapa

Za materijale koji se plastično deformišu može se bez veće greške uzeti da je  $\sigma_p \approx \sigma_v$ . Uzimajući u obzir da se pri reduciranju može usvojiti  $v=0,7$  /8/, na osnovu izraza (2) i (3), dobija se za slučaj elasto-plastičnog izvijanja sledeći izraz za proračun graničnog odnosa početnih dimenzija štapa (priprema):

$$\frac{h_0}{d_0} = \frac{\eta}{4 \cdot v} \sqrt{\frac{E}{6v}} = 1,122 \sqrt{\frac{E}{6v}} \quad (4)$$

Tako se, na primer, za ugljenični čelik Č.1220 dobija:

$$(h_0/d_0) = 1,122 \sqrt{2,1 \cdot 10^5 / 227} \approx 34$$

Na slici 2 je dat Ojler-Tetmajerov dijagram kritičnog napona /8/. Dijagram se odnosi na niskougljenični čelik za koji je napon na granici razvlačenja  $\sigma_v = 240 \text{ N/mm}^2$ .

Mnogobrojni opiti pokazuju da se elastična stabilnost štapa opterećenih aksijalnom pritiskom silom ne gubi za vitkosti  $\lambda \leq 30+40$  /8/. Kako se u realnim uslovima pri reduciranju pojavljuju odnosi  $h_0/d_0 \leq 10$ , to se prema izrazu (3) dobija da je  $\lambda \leq 28$ .

Prema tome, za stabilnost procesa obrade pri reduciranju u više operacija (stupnjeva), potrebno je da budu zadovoljeni uslovi:

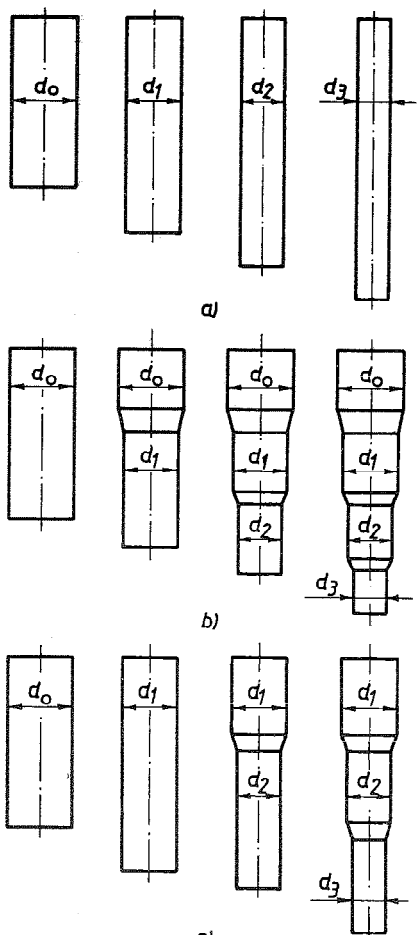
$$p_1 \leq \sigma_{v0}; p_2 \leq \sigma_{v1}; p_3 \leq \sigma_{v3}; \dots \dots p_m \leq \sigma_{vm} \quad (5)$$

gde je:  $m$  - broj operacija (stupnjeva) obrade

Dakle, za postupke reduciranja u više operacija oba fizička ograničenja procesa mogu se svesti na jedan uslov. Naime, potrebno je i dovoljno je da radni pritisak u datoj operaciji bude manji od pripadnog napona na početku plastičnog tečenja.

### 3. GRANIČNI STEPENI DEFORMACIJE PRI REDUCIRANJU U VIŠE OPERACIJA

Reduciranje u više operacija može se izvesti po različitim



Sl. 3

varijantama, u zavisnosti od zahteva tehnološkog postupka obrade, odnosno oblika izratka.

U tom smislu se ovaj postupak obrade deformisanjem može, na primer, primeniti radi redukcije poprečnog preseka priprema - "kalibrisanja", kada se obradak u potpunosti protiskuje kroz otvor matrice (Sl.3a) -VARIJANTA I.

U mnogim slučajevima reduciranje se primenjuje radi dobijanja stupnjevutih elemenata, ili, u opštem slučaju, elemenata složene geometrije, kada se reduciranje kombinuje sa drugim postupcima obrade deformisanjem (Sl.3b) -VARIJANTA II.

Najzad, moguća je i kombinacija napred navedenih varijanti reduciranja (Sl.3c) -VARIJANTA III.

Kako se reduciranje realizuje u hladnom stanju prisutno je intenzivno deformaciono ojačavanje materijala. Za analizu postupka višestupnjevitog reduciranja pogodno je krivu ojačavanja prikazati u obliku funkcije:

$$K = K_0 + C \cdot \psi^n \quad (6)$$

### 3.1. Granični stepeni deformacije po operacijama

Efektivnost postupaka obrade materijala deformisanjem, pa i reduciranja, procenjuje se prema veličini graničnog stepena deformacije.

#### a) VARIJANTA I

Polazeći od izraza za radni pritisak reduciranja datog u radu /2/, krive ojačavanja (6) i uslova (5), posle izvesnih transformacija, dobija se sledeći izraz za odredjivanje graničnog stepena deformacije po operacijama reduciranja:

$$\psi_m \left[ \sqrt{3} + 2\mu \left( m_\alpha + \frac{1}{m_\alpha} \right) \right] = \sqrt{3} \frac{K_0 + C \left( \sum_{i=1}^{m-1} \psi_i \right)^n}{K_0 + \frac{C}{2} \left[ \left( \sum_{i=1}^{m-1} \psi_i \right)^n + \left( \sum_{i=1}^m \psi_i \right)^n \right]} - \frac{4}{3} m_\alpha - 8\mu \bar{h} \quad (7)$$

gde su:  $m_\alpha = \operatorname{tg} \alpha$ ;  $\bar{h} = h/r_m = 2h/d_m$

#### b) VARIJANTA II

U ovom slučaju nestabilnost procesa može nastupiti ranije, jer se opterećenje (sila) prenosi preko nedeformisanog dela priprema. Obrazac (7) se sada transformiše u sledeći oblik:

$$\psi_m \left[ \sqrt{3} + 2\mu \left( m_\alpha + \frac{1}{m_\alpha} \right) \right] = \sqrt{3} \frac{K_0}{K_0 + \frac{C}{2} \left[ \left( \sum_{i=1}^{m-1} \psi_i \right)^n + \left( \sum_{i=1}^m \psi_i \right)^n \right]} - \frac{4}{3} m_\alpha - 8\mu \bar{h} \quad (8)$$

#### c) VARIJANTA III

Neka se najpre vrši reduciranje sa protiskivanjem obratka kroz otvor matrice u I stupnjeva, a zatim "stepenasto" reduciranje u k stupnjeva, tako da je ukupan broj stupnjeva (operacija)  $m = I + k$ .

Za prvih I stupnjeva važi izraz (7), gde umesto indeksa m treba uneti indeks I ( $I = 1, 2, 3, \dots, k-1$ ). Za sledećih k stupnjeva važi izraz (8), gde umesto indeksa m treba uneti novi indeks k ( $k = I + 1, I + 2, I + 3, \dots, m$ ). Takođe, umesto  $K_0$  u broioeu razlomka treba uneti izraz:

$$K' = K_0 + C \left( \sum_{i=1}^I \psi_i \right)^n \quad (9)$$

U svim varijantama reduciranja potrebno je proveriti da li je ispunjen uslov:

$$\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \dots + \psi_m \leq \psi_g \quad (10)$$

gde je:  $\psi_g$  - granični (maksimalni) stepen deformacije, koji materijal obratka može podneti bez medjuoperacijskog žarenja.

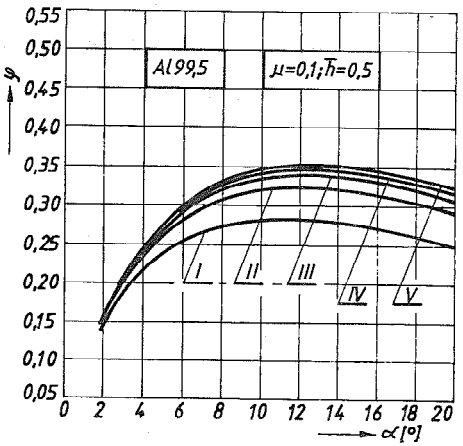
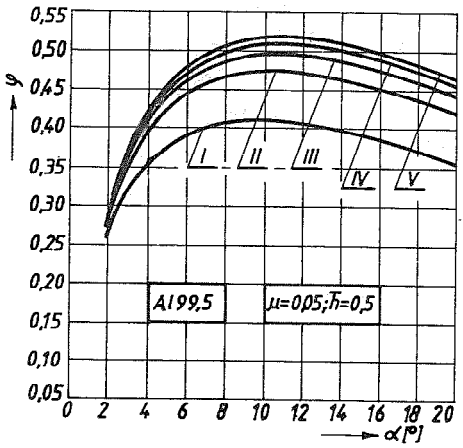
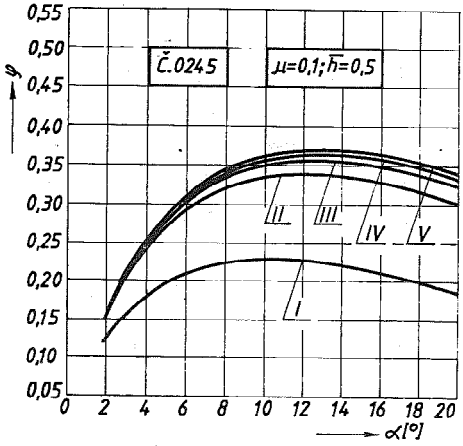
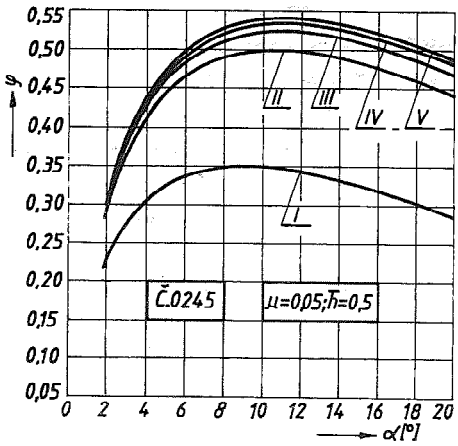
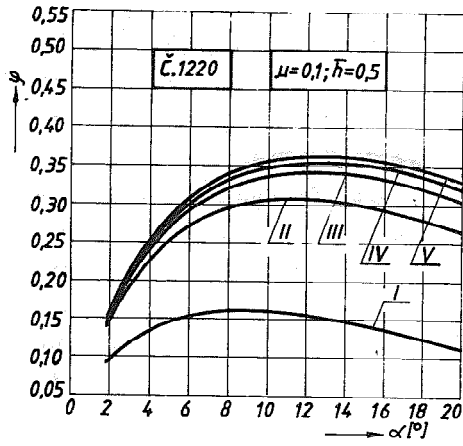
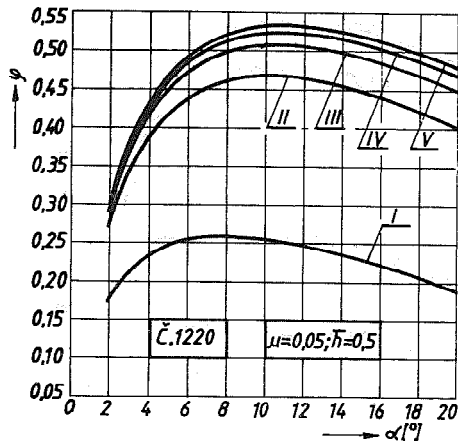
Ukoliko u k-toj operaciji ovaj uslov nije ispunjen, stepen deformacije se u toj operaciji određuje iz relacije:

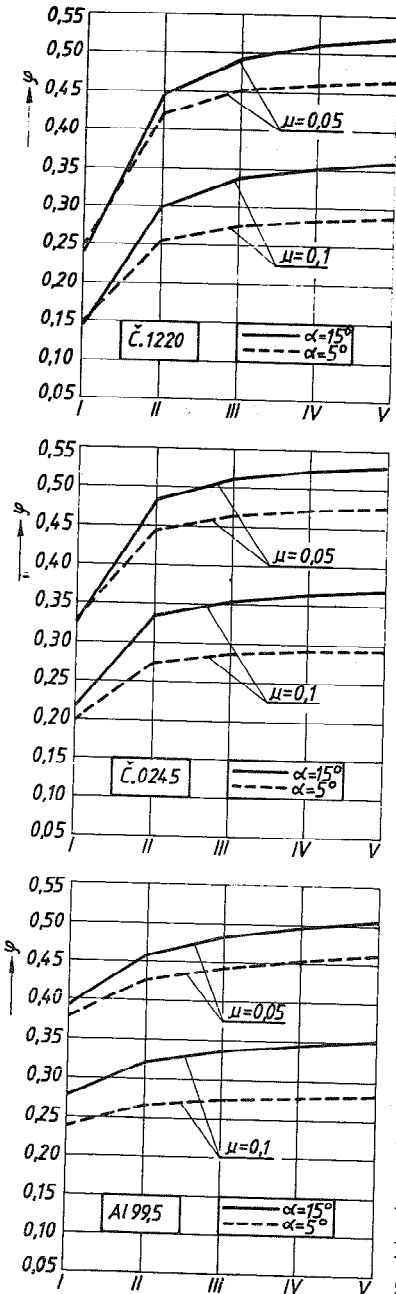
$$\psi_k = \psi_g - \sum_{i=1}^{k-1} \psi_i \quad (11)$$

### 3.2. Analiza postavljene metodologije

Radi analize date metodologije višeoperacijskog reduciranja izabrana su tri materijala: Č.1220 ( $K_0 = 227$ ;  $C = 527,6$ ;  $n = 0,381$ ), Č.0245 ( $K_0 = 251,8$ ;  $C = 296,4$ ;  $n = 0,385$ ), Al 99,5 ( $K_0 = 78,0$ ;  $C = 76,60$ ;  $n = 0,749$ ) /9/, /10/, /11/.

Izabrana je VARIJANTA I, pri čemu su uvedene sledeće pret-





Sl. 5

postavke:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = \text{const.}$ ,  $\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = \dots$ ,  $\bar{h}_m = \text{const.}$  Rezultati proračuna dati su na Sl.4 i Sl.5, gde je redosled operacija označen rimskim brojevima. Proračun je realizovan na računaru primenom programa "REDUC".

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetog, za izabranu varijantu reduciranja, zaključuje se:

Za uobičajene uslove obrade reduciranja na veličinu stepena deformacije po operacijama najviše utiče koeficijent trenja  $\mu$ , a zatim ugao nagiba  $\alpha$ . Bez obzira na vrstu materijala i ostale uslove obrade, optimalni ugao nagiba iznosi: za prvu operaciju  $\alpha_{\text{opt}} \approx 9^\circ$ ; za ostale operacije  $\alpha_{\text{opt}} \approx 12^\circ$ .

Kao rezultat ojačavanja materijala stepen deformacije raste po operacijama. Najveći porast se uočava u drugoj operaciji. Ova razlika je izraženija kod materijala sa intenzivnim ojačavanjem. Teorijski dobijene stepene deformacije potrebno je za realne uslove obrade korigovati (smanjiti), množenjem korekcionim faktorom  $\xi = 0,85 + 0,95$ .

Optimizacija postupka višestupnjovitog reduciranja može se izvršiti izborom stepena deformacije u funkciji od ugla nagiba konusa matrice, za ostale zadate uslove obrade.

Za slučaj izrade stupnjovitih elemenata reduciranjem, stepeni deformacije su znatno manji i opadaju sa porastom broja stupnjeva (operacija).

Dati postupak može poslužiti kao osnov za razvoj opšte metodologije projektovanja procesa obrade deformisanjem.

## R e f e r e n c e

- / 1/ Lange K.: Lehrbuch der Umformtechnik, Band 2, Massivumformung, Springer Verlag Berlin/ Heidelberg/ New York, 1974.
- / 2/ Marinković V.: Prilog istraživanju procesa reduciranja punih profila, "Obrada deformisanjem u mašinstvu", br. 2, Novi Sad, 1986.
- / 3/ Marinković V.: Istraživanje tečenja materijala u procesima zapreminskog (masivnog) deformisanja u hladnom stanju, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 1982.
- / 4/ Semjenov V.I. i dr.: Kovka i šampovka, Tom 3, Holodnaja ob- jemnaja šampovka, "Mašinostroenie", Moskva, 1987.
- / 5/ Beresnev B., Trušin E.V.: Process gidroekstruzii, "Nauka", Mo- skva, 1976.
- / 6/ Kamnjeckij B.I. i dr.: Process gidrstatičeskoj šampovki dlji- nnih detalej, "Kuznečno-šampovočnoe proizvodstv ", N<sub>o</sub> 9, 1981.
- / 7/ Deordijev N.T., Filimonov J.F.: Issledovanije processa mnogo- perehódnogo reducirovanija v žestkih matrieah, "Kuznečno- šampovočnoe proizvodstvo", N<sub>o</sub> 9, 1963.
- / 8/ Beljajev N.M.: Soprotivlenie materialov, "Nauka", Moskva, 1976.
- / 9/ Marinković V.: Neka istraživanja na polju obrade domaćih ma- terijala istosmernim istiskivanjem u hladnom stanju, Magis - tarski rad, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 1978.
- /10/ Musafia B.: Modelska analogija procesa ravninskog deformaio- nog stanja, "Obrada deformisanjem u mašinstvu", br. 3, Novi Sad, 1977.
- /11/ Musafia B.: Presovanje aluminiija metodom istosmjernog istis- kivanja, Naučno-stručni skup "Obrada deformisanjem", Banja Luka, 1977.

V. Marinković

MÖGLICHKEITEN UND VERFAHRENGRENZEN BEIM  
MEHRSTUFIGEN VERJÜNGEN

Zusammenfassung

Verjüngen als Umformverfahren ist von Stabilität der Roh- teile (Werkstücke) begrenzt. Der Stabilitätsverlust der Prozesse wird in der Form des Ausknickens oder Aufstachens von Werkstücke vor der Düse (Matrize) ausgedrückt.

Um diese ungewünschte Erscheinungen zu verhindern, muss in jeder Stufe (Arbeitsvorgang) die bezogene Stempelkraft kleiner als Fließspannung in den vorausgehende Arbeitsvorgänge sein.

Auf Grund solcher Betrachtungen ist die Grenzverformungs- grad jedes Arbeitsvorganges bei Verjüngen definiert.

Lj. Bogdanov\*

ПРИЛОГ АПЛИКАЦИЈИ ПОСТУПКА ИЗОСТАТИЧКОГ ПРЕСОВАЊА  
ЗА ДОБИЈАЊЕ НОВИХ МАТЕРИЈАЛА И ПОБОЛЈШАЊЕ  
МЕХАНИЧКИХ ОСОБИНА ОБЛИКОВАНИХ ИЗРАДАКА

1. UVOD

Prvi pokušaji korišćenja hidrostatičkog pritiska u tehnološkim ciljevima bili su primenjivani veoma dugo, dok nije uočeno da on ima znatan uticaj na mehanička svojstva metala i legura.

Ovaj problem nazire se još od daleke 1892. god. prilikom oblikovanja mramora i prerade kamene soli. Postupak je obavljan hidrostatičkim dejstvom, sa sviju strana (izostatičko dejstvo).

Danas se u laboratorijskim uslovima ostvaruje statički pritisak i do 200.000 bara, a kratkotrajno i do 400.000 bara. Rezultati istraživanja potvrđuju da se plastičnost materijala povećava sa povećanjem hidrostatičkog pritiska. Plastičnost pri istezanju može biti različita pa se ne može uzeti kao kriterijum.

„Hidrostatička“, odnosno „gazostatička“ obrada zasnovana je na jednovremenom kombinovanom uzajamnom dejstvu visokog pritiska (do 200 MPa) i temperature (do 1500–2000°C) na pripremak.

Zadnjih 50-tih godina ovaj vid obrade je jedan od najprogresivnijih i perspektivnih tehnoloških procesa za dobijanje visokokvalitetnih monolitnih komada od metalnih i nemetalnih praškova.

Nadalje, metodom difuzionog spajanja moguće je spojiti (zavariti) komade složenih oblika iz jednorodnih i raznorodnih materijala (npr. metal i keramika); uklanjanje makrodefekata kod odlivaka i dr.

Izradak oblikovan izostatičkim presovanjem ima gustinu blisku teorijskoj sa visokim mehaničkim svojstvima, tj. dobija se sitnozrnasta struktura, sa povišenim osobinama.

---

\*Dr Ljubomir Bogdanov, dipl.maš.inž. naučni saradnik MIN Instituta „Edvard Kardelj“, Niš, Višegradska br. 33.



Kod pojedinih izradaka poboljšanje mehaničkih karakteristika postiže se:

- povećanje zatezne čvrstoće za 20–30%;
- karakteristike plastičnosti za 50–60%;
- postojanost čvrstoće u uslovima zamora za 80–100%;
- udarna žilavost do dva puta;
- radni vek izratka 1,3–1,8 puta, itd.

Iz tih razloga porast tehnologije izostatičkog presovanja godišnje ide do 70%.

## 2. OSNOVNE ŠEME PROCESA IZOSTATIČKOG PRESOVANJA I KLASIFIKACIJA

Na osnovu istraživanja i zaključaka teorijske analize razrađen je čitav niz tehnoloških procesa vrućeg izostatičkog presovanja veće grupe metala i njihovih komponenti.

Vruće izostatičko presovanje rešava složene tehnološke probleme kako u oblasti deformisanja, tako i u drugim oblastima, npr. u oblasti zavarivanja raznorodnih materijala, dobijanja novih konstruktivnih materijala, kompozitnih, bimetalnih, granulatnih i dr.

Oblast primene procesa vrućeg izostatičkog presovanja ne ograničava se na primerima publikovanim u monografijama, već se širi daljim istraživanjima. Realna primena procesa izostatičkog presovanja zavisi od duboke tehnološke analize čitavog procesa.

Procesi vrućeg izostatičkog presovanja mogu biti klasifikovani prema:

- agregatnom stanju radne sredine,
- prenosu pritiska,
- brzini deformisanja,
- odnosu bočnih i vertikalnih pritisaka,
- mogućnosti stvaranja pritiska u radnoj sredini.

U zavisnosti od agregatnog stanja radne tekućine (sredine), mogućnosti izostatičkog presovanja u vrućem stanju mogu se podeliti u 4 osnovne grupe:

1. Gazostatičko presovanje: radna sredina je gasna materija visokog pritiska.
2. Hidrostatičko presovanje: radna sredina je u tečnom stanju ili polutečnom sa povišenom viskoznošću.
3. Izostatičko presovanje u kvalitetnoj sredini: radna sredina je od materijala sa malom otpornošću na smicanje deformacije, praškovi.
4. Izostatičko presovanje u čvrstim omotačima: mogu biti metalni i nemetalni.

Povišena atezija metala pri visokim temperaturama često dovodi do nalepljivanja metala priprema sa alatom, pa je umanjen kvalitet površine izratka.

Kod vrućeg izostatičkog presovanja uočljiva je znatna neravnomernost tečenja metala priprema kroz matricu, pa se mogu pojaviti anizotropna svojstva izratka.

Pri izradi tehnologije vrućeg izostatičkog presovanja naznačajniji problem je održavanje temperature priprema i stvaranje uslova za maksimalno ravnomerno rasprostiranje temperature u toku procesa istiskivanja. Pri tom je neophodno računati sve mogućnosti gubitka toplote u toku tehnološkog ciklusa.

Izostatički proces presovanja u vrućem stanju sa tečnom sredinom zahteva određene predostrožnosti. Naime, kontejner i matrica moraju biti zagrejani do temperature (400–500°C) pomoću ugrađenog induktora određene učestanosti. Tečnost se zagreva u specijalnom rezervoaru do temperature ključanja. Poželjno je da tečnost ima minimalnu toploprovodljivost i toplotni kapacitet, a treba i smanjiti vreme kontakta priprema sa radnom tečnošću. Ovaj vid hidropresovanja je spor i manje je u upotrebi. Ulsovi bliskim izotermičkim stvoreni su pri vrućem hidropresovanju sa premazom priprema staklastom masom debljine 1–2 mm. Priprema se stavlja u debelosteni sud od vatrootpornog materijala i zagreva u peći do temperature deformisanja.

Prema tehnološkim mogućnostima i održavanju mazivnih karakteristika sredstava za podmazivanje, a radi smanjenja trenja između priprema – izratka i alata, procesi hidropresovanja se mogu klasifikovati kao:

a) Hladno hidropresovanje: obavlja se pri pritisku manjem od 10.000 bara, a za druga mazivna sredstva većem od 10.000 bara.

b) Toplohidropresovanje: obavlja se pri temperaturi  $t = 500^{\circ}\text{C}$ .

c) Vruće hidropresovanje: obavlja se pri temperaturi  $t = 700\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ .

U zavisnosti od brzine deformisanja, proces vrućeg hidropresovanja može se podeliti na:

a) hidrostatičko presovanje sa brzinama deformisanja 2–150 mm/s,

b) hidrodinamičko presovanje sa dijapazonom brzina deformisanja 200–1000 mm/s,

c) visokobrzinsko (impulсно) hidropresovanje sa brzinama deformisanja većih od 10000 mm/s.

Sa povećanjem brzine deformisanja uvećava se debljina i stabilnost podmazujuće plohe, što povoljno utiče na kinetiku i dinamiku procesa istiskivanja. Maksimalno početnog pritiska je izbegnut „STICK SLEEP“ (kretanje čestice metala sa trzajima) je umanjeno; žarište deformacije lokalizuje je neposredno u konusu kalupa pa se poboljšavaju strukturalna svojstva polufabrikata visokobrzinskim načinom deformisanja.

### 3. KOMPARATIVNA ANALIZA PROCESA HLADNOG I VRUĆEG IZOSTATIČKOG PRESOVANJA (HIDROPRESOVANJA)

Obrada materijala u vrućem stanju je osnovni oblik za većinu materijala kod obrade deformisanjem gde dolazi do smanjenja deformacionog otpora i porasta plastičnosti, te su u procesu rada manji energetski troškovi.

Proces hidropresovanja posmatra se kao proces obrade metala deformisanjem u hladnom stanju. Proces hidropresovanja sa zagrevanjem je bez perspektive (prema nekim autorima) zato što hidroekstruzija (hidro istiskivanje) u vrućem stanju znatno uvećava čvrstoću pri održavanju visokog nivoa plastičnosti. Prema drugim autorima teško je održati viskozna svojstva sredstva za podmazivanje gde je temperatura metala – priprema (1000–1200°C) a stena kontejnera za prihvat alata (350–400°C).

Međutim, najnovija istraživanja (1) (3) potvrđuju niz prednosti hidropresovanja u vrućem stanju u odnosu na hladni postupak. Svakako, da su pri razradi procesa vrućeg hidropresovanja u startu teškoće vezane za izbor radne sredine i podmazivanja, za obezbeđenje izotermnih uslova presovanja. Zahlađenje površina priprema zagrejanog do visoke temperature dovodi do povećanja neravnomernosti tečenja metala. Pravilnim izborom radne sredine i mazivnog sredstva ukazane poteškoće vrućeg hidropresovanja mogu se savladati i kao postupak može se uspešno sprovesti u tehnološkim sistemima, odnosno procesima. Pri vrućem hidropresovanju

naglo se smanjuje sila istiskivanja.

Naglo smanjenje pritiska pri vrućem hidropresovanju uprošćava model opreme i postupak obrade. Otpada neophodnost stvaranja višeslojnih ojačanih namotaja kontejnera, ojačanje veza stubova mašine, pa je moguće ostvariti proces na standardnim serijskim presama sa hidrauličnim ili mehaničkim načinom ostvarivanja sile. Prisutne su teškoće povezane sa obezbeđenjem sigurne hermetičnosti kontejnera pri visokoznom hidropresovanju.

U dijapazonu temperatura 500–1500°C, brzinama deformisanja 700 mm/s i viskoznom radnom sredinom, ostvaren je proces na klasičnim presama bez nekih posebnih uslova hermetizacije

Vruće hidropresovanje bezbednije je od hladnog postupka, što se objašnjava smanjenjem pritiska i malom stišljivošću radne sredine.

Izvesno je da se deformacijom u hladnom stanju znatno povećava čvrstoća prešovanog izratka, a kod zgrevanja naglo se smanji. Vruće hidropresovani štapovi su posle kaljenja imali povišenu čvrstoću, i to znatno višu od hladno presovanih. Zato je postupak vrućeg hidropresovanja sa primenom postupka termičkog označavanja veoma perspektivan kod oblikovanja vatrootpornih teško deformišućih materijala. Istraživanja su potvrdila (1) da ako se doformacija vatrootpornih legura postupkom vrućeg hidropresovanja obavi pri temperaturama za 30–50°C nižim od temperature rekristalizacije u staklo-grafitnoj sredini, sa stepenom deformacije većim od 70% formira se sitnozrna struktura sa zrnom prečnika manjim od 10 mkm, a ako se proces obavi pri temperaturi višom za 40–60°C od temperature rekristalizacije dobiće se veličina zrna 100–150 mkm.

Oblikovanje izradaka iz žitkog ili polužitkog stanja postupkom vrućeg hidropresovanja je perspektivna tehnologija oblikovanja. Redosledna promena zapremine izratka i proceskristalizacije ostvaruje se uz neposredni dodir tečne ili polutečne mase sa površinama alata.

Neki autori su pokušali, da provere Gubkinovu hipotezu (4) da: deformacija metala u polužitkom stanju može kardinalno promeniti njegova svojstva blagodarći stišljivosti međuzrnih prostora lako toplije materije.

Eksperimenti su potvrditi ovu Gubkinovu hipotezu i razrađeni su originalni tehnološki procesi. Dobiveni su izradci tankog prescka (list, žica, profil) iz jednog prolaza od vatrootpornih legura.

Tehnologija obrade metala deformisanjem je pred ozbiljnim problemima povezanim sa osvajanjem i već osvojenim novim materijalima, teškotopljivih, vatrootpornih, granulatnih, praškastih, kompozitnih (višemetalnih), armiranih, sa vlaknima visoke čvrstoće i dr., pri čemu je proces izostatičkog presovanja nezamenljiv proces. Procesi hidropresovanja kriju u sebi ogromne nerealizovane mogućnosti za stvaranje i osvajanje proizvodnje novih materijala.

Pri dobijanju novih materijala isključivo važan značaj imaju difuzioni procesi za spajanje zavarivanjem zasebnih elemenata granula, praškova raznorodnih materijala, kao i procesi deformacije pri jedovremenom dejstvu visokih temperatura i pritiska, a radi dobijanja visokokvalitetnih polufabrikata. Vruće presovani materijali pod visokim pritiscima i temperaturama sa korišćenjem tehnološke osobine zavarljivosti, obradljivosti i dr. je u perspektivi i reda kod proizvodnje delova gasnih turbina, motora, energetske opreme, avio industrije, satelitske tehnike i dr., kao važan faktor kompleksne tehnologije proizvodnje.

#### 4. TRENUTNO STANJE OPREME I PERSPEKTIVA RAZVOJA

Istraživanja se uglavnom obavljaju u tzv. pilot postrojenjima. Topla izostatička obrada (HIP – hipovanje) pruža mnoge prednosti; umanjuje poroznost kod odlivaka, uklanja unutrašnje defekte, postiže punu gustinu ako se radi izradak iz praškastih komponenti, itd., itd. Mada je postupak primenjen sredinom pedesetih godina izostatičko presovanje se može smatrati novom tehnologijom. U zadnjih 10 godina najviše je porasla primena u metalurgiji praha.

Osnovna funkcija jedne toploizostatičke prese sastoji se u ravnomernom zagrevanju radne sredine uz istovremenu primenu inertnog gasa pod veoma visokim pritiskom i odgovarajuću kontrolu ovih dvaju parametara u toku radnog vremenskog ciklusa. Osnovni elementi mašine „gazostata“ su: slika 1.

– Kontejner: Sud pod pritiskom, jedna od glavnijih komponenti sistema. Glavni problem je bezbednost. Potrebno je identifikovati sva naprezanja, zamor, koroziju i konstruktivno rešiti sistem sa aspekta bezbednosti.

– Sistem hlađenja: Zidovi kontejnera, poklopci i dr. moraju biti hlađeni zbog izdržljivosti.

– Peć: mora da stvori uslove za zagrevanje priprema do željene temperature, željenom brzinom i sa potrebnom preciznošću, grejni elementi se biraju u zavisnosti od visine temperature.

– Sistem kompresije: U početku razvoja korišćen je helijum. Njegova gustina mnogo je manja od gustine argona. Danas se argon isključivo koristi kao medijum zbog cene. U sklopu ove komponente su kompresori visokih pritisaka (2000 bara).

– Sistem upravljanja: Proces se može upravljati daljinski, automatski uz kompjutersko vodenje preko mikroprocesora ili kombinovano sa ručnim upravljanjem. Upravljački sistem treba da obezbedi i kompletan alarmni sistem u slučaju poremećaja određenih nivoa pritiska i temperature.

– Alat: Alat koji se koristi kod toplog izostatičkog presovanja (hipovanja) zavisi od namene. Treba uočiti razliku između prethodno oblikovanih uz naknadnu stišljivost (karbidni delovi, odlivci) i otvrdnjavanje izradaka iz praha.

– Noseća konstrukcija: Svi elementi sistem transporta za širiranje i dešaržiranje je preko sistema upravljanja ukomponovan u nosećoj konstrukciji.

##### 4.1. PROIZVODNJA I KORIŠĆENJE „GAZOSTATA“

Procesu izostatičkog presovanja kao obliku moderne tehnologije predviđa se veoma intenzivni razvoj i porast primene.

Prvi za civilnu primenu proizveden je „Gazostat“ u Institutu BETELJA SAD. Unutrašnji prečnik kontejnera iznosio je 49 mm u rastojanje između poklopaca 533 mm. Radni pritisak bio je 35 MPa, a temperatura 810°C. Kontejner je imao spoljni grejač i proračunat je na 540 časova rada.

Samo u SAD u toku 1980. god. proizvedeno je više od 100 komada „Gazostata“.

U prilogu u tabeli 1. data je struktura „Gazostata“, kao i zemlje gde su proizvedeni. Kao što se vidi najveći proizvođači su SAD i Kanada, gde je od broja 163 mašina 90 kom. koristi za naučnoistraživački rad.

Prema najnovijim podacima iz biltena Institua i firmi koje se bave ovom problematikom u toku 1985. god. broj „Gazostata“ u svetu porastao je do 600 kom., a od tog broja 300 kom. samo u SAD. Trenutno najveći porast izrade ovakvih mašina je u Japanu.

Najveći „Gazostat“ proizveden je u Švedskoj, prečnik komore je 1752 mm, visina 2997 mm i može da preradi godišnje 2450 t praškastih komponenti sa 300 ciklusa rada i koeficijentom iskorišćenja radnog prostora oko 25%.

Interesantno je spomenuti i „Gazostat“-e firme DEGUS-a iz Zapadne Nemačke koji rade sa niskim pritiscima 2–6 MPa i radnom temperaturom 1000–2000°C. Namereni su za plastificiranje, pečenje nanešenih slojeva na metal i dr.

Opšti je zaključak da su još uvek neiskorišćene mogućnosti izostatičkog presovanja, pa je naučnoistraživački rad na ovim programima od posebnog značaja za praksu.

Tabela 1.

Namena gazostata	Ukupno		SAD, Kanada	Evropa	Japan	Druge zemlje
	kom.	%				
Istraživanja	171	56	90	41	25	15
Obrada tvrdih legura	55	18	23	14	13	5
Obrada i izrada odlivaka	11	3,8	10	1	0	0
Obrada vatrootpornih legura	11	3,6	10	1	0	0
Obrada brzoreznih čelika	5	1,6	1	1	2	1
Obrada keramike	3	1	1	0	1	1
Obrada materijala tipa ugljenik–ugljenik	10	3,3	8	2	0	0
Rad po spec.zahtevu	27	9	15	12	0	0
Obrada ferita	4	1,3	1	0	3	0
Obrada mat.za dob. optičkih vlakana	1	0,3	0	1	0	0
Obrada materijala za atom.energetiku	3	1	2	1	0	0
Nema podataka	4	1,3	2	0	2	0
<b>Ukupno:</b>	<b>305</b>	<b>100</b>	<b>163</b>	<b>74</b>	<b>46</b>	<b>22</b>

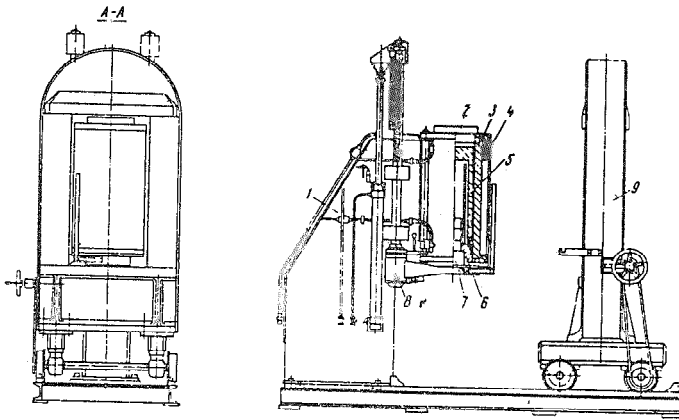
## 5. ZAKLJUČAK

Izostatičko presovanje sa uspehom se primenjuje za izradu komponenti za gasne turbine mlaznih motora, habajućih karbidnih delova kod rudarskih kruna za bušenje, odlivaka od titanijuma i njegovih legura, keramičkih pločica za razne alate; za gredice od brzoveznih čelika; difuziono spajanje nejednorodnih materijala; za kombinaciju ugljenik–ugljenik za matrice, za impregnaciju metala ortopetski implantirajući delovi, dobijanje novih materijala i dr.

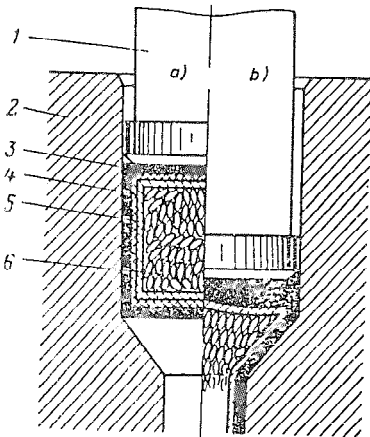
U bliskoj budućnosti očekuje se primena oblikovane keramičke mase za turbine i dizel-motore u uslovima visokih temperatura; hermetizacija nuklearnog otpada; površinsko spajanje raznih prevlaka na metal i dr.

Dalja istraživanja su ka smanjenju parametara pritiska i temperature i povećanje bezbednosti postrojenja. Slede ogromna ulaganja za aplikaciju ove tehnologije u svetu jer su kao prioritetni pravci u razvoju kompleksnog programa (SEV) i EUREKE (Evropske zajednice).

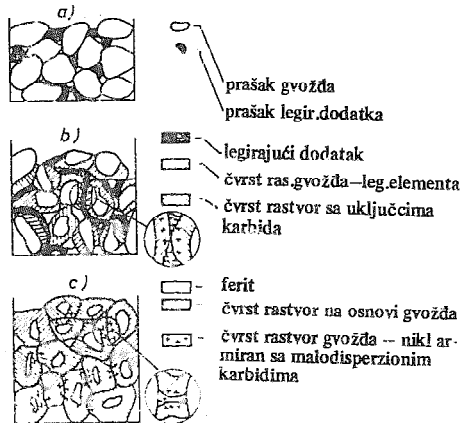
Prilog:



Slika 1. Gazostat firme ASEA (Švedska) sa pokretnim jarmom za blokadu i prihvatanje donjeg zatvarača pri šaržiranju sa donje strane. 1. – nosač kontejnera 2 – gornji zatvarač; 3 – prsten kontejnera; 4 – omotač kontejnera; 5 – termoizolacioni poklopac; 6 – središnji zatvarač; 7 – donji zatvarač; 8 – mehanizam za otvaranje i zatvaranje donjeg zatvarača; 9 – pokretni jaram.



Slika 2. Šema procesa vrućeg hidropresovanja granula. a) početak procesa; b) kraj procesa. 1 – potiskivač; 2 – kontejner; 3 – staklografitni omotač; 4 – staklena čaša; 5 – čelični omotač; 6 – granulata.



Slika 3. Šema procesa pečenja složene legure na osnovu praška čistog gvožđa. a) presovanje; b) početak procesa pečenja; c) kraj perioda pečenja

## Reference

- (1) Kolašnikov A.I. i dr.: Gorjačeje gidropresovanije metaličeskih materijalov, Moskva, „Mašinstrojenje“, 1977.
- (2) Černii J.U.F. i dr.: Gidropresovanije instrumentalnih stalei, Kiev, „Tehnika“, 1987.
- (3) Bałakin V.F. i dr.: Gidropresovanije trub, Kiev, „Tehnika“, 1986.
- (4) Gubkin S.I.: Teorija obrabotki metalov davleniem, Moskva, „Metalurgizdat“, 1947.
- (5) Raes H.D.B.: Hot izostatic press tehnology powder metalurgy, 1983, vol. 26, N<sup>o</sup> 4.
- (6) Grudev A.P. i dr.: Trenie i smaski pri obrabotke metalov davleniem, Spravočnik, Moskva, Metalurgija, 1982.
- (7) Anciferov V.N. i dr.: Zaimnaja difuzija i gomogenizacija v poroškovih materijalah, Moskva, Metalurgija, 1988.
- (8) Radni materijal sa učešća autora u svojstvu specijaliste za Gazostate i hidrostate u Harkovu, 1988.

Lj. Bogdanov

BEITRAG DER VERFAHRENSAPPLIKATIONEN DES ISOSTATISCHEN PRESSENS  
ZUR GEWINNUNG VON NEUEN WERKSTOFFEN UND ZUR VERBESSERUNG DER  
MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DER GEFORMTEN WERKSTÜCKE

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden die unausgenutzten Möglichkeiten der Werkstoffplastizitätsanstieges, wenn dieses Werkstoff der gleichzeitigen Wirkung des Hochdruckes und der Hochtemperatur ausgesetzt wird, dargestellt. Durch die Ausnutzung dieser Eigenschaft, sowie der anderen Resources der Werkstoffplastizität ist es möglich geworden, die neuen Werkstoffqualitäten zu bekommen, die schwerverformbaren Werkstoffe zu verformen, und die mechanischen Eigenschaften der verantwortlichen Spezialteile zu verbessern.

Die Prozesse der isostatischen Pressverfahren haben die unausgenutzten Möglichkeiten für die praktische Verwendung, und auch sehr grosse Perspektive für den weiteren Einsatz.

Lj. Bogdanov\*  
P. Popović\*  
S. Marković\*

INOVIRANJE POSTUPKA IZRADE RADNOG KOLA  
HAVARIJSKE PUMPE ZA NUKLEARNE ELEKTRANE  
PRIMENOM POSTUPKA IZOSTATIČKOG PRESOVANJA

1. UVOD

Radno kolo je odgovoran deo pumpe čija je namena transportovanje napojne vode iz dearatora u parogenerator u havarijskim režimima rada nuklearne elektrane, sa ciljem rashladi- vanja bloka do potpunog prestanka rada istog ili izlaska iz havarijskog stanja.

Pumpa je sedmostepena, protoka  $0,0416 \text{ m}^3/\text{s}$ , napora 9 MPa, temperature vode  $0-165^\circ\text{C}$  i broja obrta  $49,5 \text{ s}^{-1}$ .

Radi zadovoljenja karakteristika Q-H tokom celog vremena eksploatacije nuklearne elek- trane, predviđenog na 30 god., radno kolo je izrađeno od nerđajućeg čelika 20 X 13 (GOST) iz odlivka, koje, prema tehničkim uslovima, u toku celog vremena eksploatacije treba da održi visoke mehaničke karakteristike kao i hemijsku i korozionu stabilnost. Od početka livenja do završne obrade izradak se kontroliše ultrazvukom i penetrandskom (magneino—praškastom) me- todom kontrole bez razaranja. Pored toga, posle svakog otklanjanja defekata postupak kontrole se ponavlja. Sam postupak otkrivanja i otklanjanja defekata u radnom kolu je dugotrajan i nauko- trpan, a ne isključuje ni mogućnost da se i posle završne obrade ne otkriju drugi defekti u materi- jalu pa se kao takvo ne može „popravljati“ i mora se odbaciti kao neispravno. Veoma je dug cik- lus obrade (pored mehaničke obrade, dorade i termička obrada) te svako skartiranje radnog kola stvara velike probleme oko isporuke pumpi. I pored nastojanja da se unarnji problem (radi ih i inostrani partner), ipak je još uvek prisutan. Iz tih razloga pokušaj primene postupka izo- statičkog presovanja za poboljšanje mehaničkih karakteristika i otklanjanje unutrašnjih defekata odlivka doći će do punog izražaja. Na sl. 1 data je skica radnog kola sa uočenim defektima koje je podvrgnuto izostatičkom presovanju (HIP—postupku; hipovanju) u radnoj organizaciji PP T. Užice.

---

\*Dr Ljubomir Bogdanov, dipl.maš.inž., Naučni saradnik MIN Institut „Edvard Kardelj“, Niš, Višegradska br. 33.

\*Dr Predrag Popović, dipl.maš.inž., Redovni profesor Mašinski fakultet Niš, Beogradska 14.

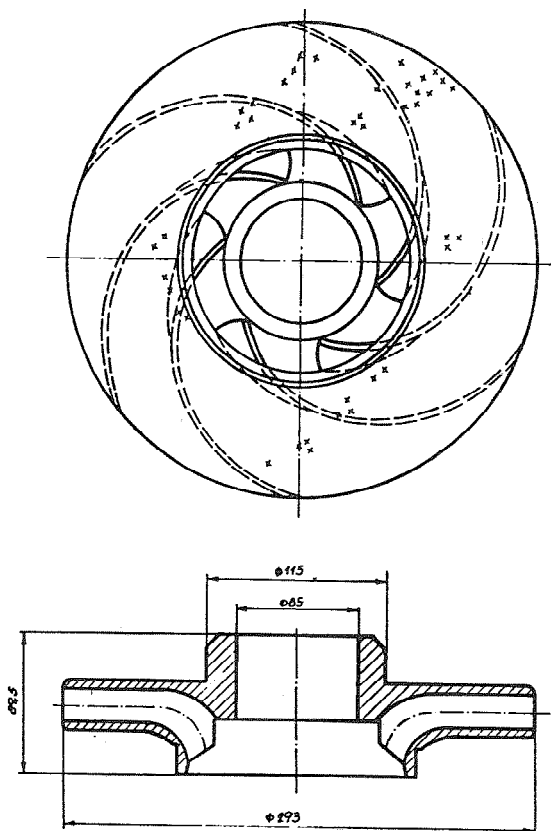
\*Slobodan Marković, dipl.maš.inž., Samostalni stručni saradnik MIN Institut „Edvard Kardelj“ Niš, Višegradska 33



Zahtevi za poboljšanje kvaliteta u oblasti prerade čelika bilo deformisanjem, livenjem, mašinskom obradom ili drugim postupcima uticali su na uvođenje inovacija u tehnološki postupak izrade. Naročito su ti zahtevi izraženi kod izradaka za potrebe energetske, motorne, transportne, fluidne i dr. opreme, naročito u pogledu vatrootpornosti, korozione stabilnosti, dugog veka trajanja, zadržavanja određenog nivoa mehaničkih karakteristika materijala u područjima viših temperatura itd. Postupak izostatičkog presovanja pruža nove mogućnosti za rešavanje dela ovih problema.

## 2. TEHNIČKI USLOVI ZA IZRADU ODLIVKA RADNOG KOLA HAVARIJSKE PUMPE

Odlivak kvaliteta materijala 20X13 A (GOST 2176-77) je sa sledećim hemijskim sastavom i mehaničkih karakteristika:



Sl. 1. Radno kolo havarijske pumpe za nuklearne elektrane

Zahtevan hemijski sastav	Ispitani hemijski sastav	Mehaničke karakteristike	Ispitane mehaničke karakteristike
C = 0,10–0,25%	C = 0,25%	$R_m \geq 600 \text{ MPa}^2$	$R_m = 534 \text{ MPa}$
Si = 0,20–0,80%	Si = 0,56%	$R_{0,2} \geq 450 \text{ MPa}^2$	$R_{0,2} = 730 \text{ MPa}$
Mn = 0,30–0,80%	Mn = 0,52%	$\delta_5 \geq 16\%$	$\delta_5 = 20\%$
Cr = 12–14%	Cr = 13,96%	$W \geq 40\%$	$\psi = 51\%$
Ni $\leq$ 0,50%	N = 0%	$a_k \geq 40 \text{ J/cm}^2$	$a_k = 39,3 \text{ J/cm}^2$
Cu $\leq$ 0,80%	Cu = 0,24%	$H_B = 170–240$	$H_{Rc} = 17$
S $\leq$ 0,025%	S = 0,020%		
P $\leq$ 0,030%	P = 0,024%		

Posle livenja odlivak podleže termičkoj obradi normalizaciji na 960–980°C, a potom niskom otpuštanju na temperaturi 730–750°C hlađenje posle normalizacije i popuštanja je na vazduhu. Ceo proces termičke obrade je veoma dug i traje cca 48 h.

### 2.1. Faktori vezani za svojstva materijala

Od značaja su uticajni faktori uslovljeni tehnološkim postupkom izrade, tj. da li se proces obavlja u hladnom ili vrućem stanju. Sa tog aspekta, hemijski sastav materijala, prisustvo nemetalnih uključaka, fazno stanje, veličina zrna, polazna struktura, temperatura, brzina deformacije, naponsko stanje i dr., posmatrani kao makro i mikro činioci uslovljavaju vođenje procesa i pouzdanost dobijanja željenih rezultata i osobina materijala. Deformacioni otpor livene strukture čini 0,7–0,95 od vrednosti kovane strukture. To se da identifikovati na krivi tečenja materijala.

### 3. UVOĐENJE POSTUPKA IZOSTATIČKOG PRESOVANJA ZA OTKLANJANJE UNUTRAŠNJIH DEFEKATA RADNOG KOLA HAVARIJSKE PUMPE

Proces izostatičkog presovanja u vrućem stanju („Hipovanja“) obavljen je na grubo obrađenom odlivku radnog kola. Pethodno su obavljena sva ispitivanja hemijskog sastava, tvrdoće i metalografije.

Osnovni parametri procesa su temperatura i pritisak. Proba je obavljena na 2 radna kola pod sledećim režimima:

I kolo;	$t = 1000^\circ$	(temperatura kontejnera)
	$p = 1250 \text{ bar}$	(pritisak radne sredine argona)
	$t = 6 \text{ h}$	(vreme trajanja procesa)
II kolo:	$t = 1150^\circ$	
	$p = 1250 \text{ bara}$	
	$t = 4 \text{ h}$	

Aktivna sila je stvorena preko sabijenog argona na sve površine radnog kola. Nasuprot aktivnoj sili je reaktivna sila kao posledica deformacionog otpora materijala. Uzajamno dejstvo tih sila karakteriše naponsko stanje tela. Problem mehanike deformišućeg tela svodi se na promenu njegovih dimenzija, oblika i proučavanju otpora unutar tela pod dejstvom spoljašnjih sila. Problem se posmatra sa tri aspekta: geometrijskog, mehaničkog i fizičkog.

Radi lakšeg posmatranja procesa smatraće se da je radno kolo sastavljeno od veoma velike količine materijalnih čestica (hipoteza spoljne građe) koje su veoma male u odnosu na posmatrano telo pa su feformacije jednorodne. Ovakav pristup uprošćuje problem jer svaka čestica je definisana trima koordinatama. Ujedno svaka materijalna čestica smatra se dovoljno velikom u odnosu na zrno, pa se dozvoljava neuzimanje u obzir anizotropnost svakog zrna.

Proces se modelira tako da se deformacija sprovodi razmeštanjem čestica bez narušavanja suštine i poretka unutar strukture radnog kola. Ovakav pristup dozvoljava opisati proces putem određivanja rastojanja između čestica pre i posle deformacije (relativno izduženje ili suženje).

Za utvrđivanje zakonitosti izmeštenih materijalnih tačaka u maloj zapremini izabraće se tačka  $M$  raspoređena u elementarnoj zapremini. Tačka će ostati na površini, ali posmatrana kao čestica sferičnog oblika (kugla) deformisana u oblik elipsoida. Kako je zapremina lopte  $V_0 = 4/3 \pi r^3$  a zapremina elipsoida  $V = \frac{4}{3} l \cdot b \cdot h$ , koristeći uslov jednakih zapremina i deobom gornjih jednačina, a zatim logaritmovanjem dobija se:

$$\ln \frac{V}{V_0} = \ln \frac{l}{r} + \ln \frac{b}{r} + \ln \frac{h}{r} = e_1 + e_2 + e_3 \quad (1)$$

Ako je  $l$  najveća mera elipsoida,  $b$  srednja i  $h$  najmanja (ti pravci su ujedno i glavne ose), onda od izmena glavnih osa zavisi i karakter deformacije (istezanje, smicanje, sabijanje).

Izučavanje deformacije je izučavanje pomeranja čestica (tačaka) tela u međusobnom odnosu u toku deformisanja. Prema tome, ne posmatra se prenosno pomeranje tačke u telu.

Uobičajeno je da deformacije do 10% smatraju se malim a preko toga konačnim.

U početnom stadijumu opisane deformacije su male i imaju karakter elastičnih deformacija u zavisnom stadijumu oblik geometrijskog mesta zrna (tačaka) postaje kriva linija (tok vlakana).

Može se uočiti da je veoma komplikovan mehanizam naponskog stanja radnog kola, te se naponsko stanje može opisati samo preko tenzora napona u datoj tački, u neprekidnoj sredini.

Ako su u toj tački glavni naponi jednaki  $R_1 = R_2 = R_3 = \pm R$ , onda elipsoid napona prelazi u sferu (loptu), pa je takvo stanje ravnomerno, odnosno hidrostatičko.

### 3.1. Cilj pokušaja istraživanja

Poznato je da se metodama termomehaničke obrade mogu poboljšati eksploataciona svojstva izradaka sa visokim stepenom sigurnosti.

Poznato je da dejstvo visokog hidrostatičkog, odnosno gazostatičkog pritiska na materijal izratka dovodi do suštinskog povećanja plastičnosti materijala, pa su moguće deformacije teško deformišućih materijala u širem intervalu.

U kontejneru, gde je izradak izložen dejstvu pritiska sa sviju strana (izostatičko dejstvo), nije sabijanje u klasičnom smislu, te visoki gazostatički pritisak sa sviju strana isključuje pojavu prskotina pri samom početku presovanja. (Kod klasičnog sabijanja izbočavanje spoljnih površina npr. vuljka, postoje već započete prskotine u određenim tačkama i delićima površina.)

Bolji su i povoljniji uslovi tečenja metala radi znatnog smanjenja kontaktnog trenja ostvarivanja bolje ravnomernosti deformacije između zidova kontejnera i odlivka postoji u stvari viskozno trenje, te veći deo žarišta deformacije nema mogućnosti stvaranja „mrtvih“ zona, pa je omogućeno ravnomernije tečenje materijala.

Kod vrućeg izostatičkog presovanja prisutni su difuzioni procesi gde se može ostvariti zavarivanje spojenih ili razdvojenih jednorodnih i raznorodnih čestica jer pod dejstvom pritiska i temperature nastaje intenzivna pokretljivost čestica.

Prisutne su i strukturne promene. Kao što je poznato porast zrna zavisi od dimenzija karbidnih čestica (1).

Positivnu ulogu imaju mali karbidi raspoređeni po granicama zrna do potpunog rastvaranja. Smanjenjem nejednorodnosti materijala postižu se veći efekti hidropresovanja u pogledu usitnjavanja zrna. Može se uočiti da se izborom kriterijuma vrućeg izostatičkog presovanja može u širokim granicama upravljati strukturom i mehaničkim svojstvima dobijanja polufabrikata i gotovih izradaka. Ako se problem posmatra sa aspekta plastičnosti materijala, onda se rešava zahtev tehnologije, a ako se posmatra nivo mehaničkih ili drugih osobina, onda se pored tehnologije rešava i problem parcijalnih činilaca tehnološkog procesa, a sve sa ciljem optimiziranja troškova izrade i kvaliteta.

### 3.2. Kinetika procesa izostatičkog presovanja

Svestranični pritisak radne sredine na deformišući materijal (radno kolo) pozitivno utiče na šemu naponskog stanja u zoni deformacije. Neke sabijene radne sredine pod supervisokim pritiskom izazivaju negativne pojave u procesu hidropresovanja. Sažimljivost (stišljivost) i elastična svojstva radne sredine u početnom stadijumu istiskivanja, uslovi trenja od faze suve do hidromehaničke i dr. je složen problem za kontrolu procesa deformisanja.

Više puta je pokazano da zakon tečenja radne sredine u dodiru sa metalom u kontejneru je složen i nikada se ne ispunjava Paskalov zakon o ravnomernom prenosu pritiska radne sredine na materijal. Iz tih razloga sam proces vrućeg izostatičkog presovanja ne može se posmatrati kao monotono razvijajući proces, već kao složeni i mogu se proučavati samo delovi ciklusa.

Pri razradi tehnologije vrućeg izostatičkog presovanja neophodno je izabrati optimalne parametre procesa:

- sastav i osobine radne sredine,
- uslovi ostvarivanja sile deformisanja,
- temperaturno—brzinski uslovi,
- dozvoljeni stepen deformacije i dr.

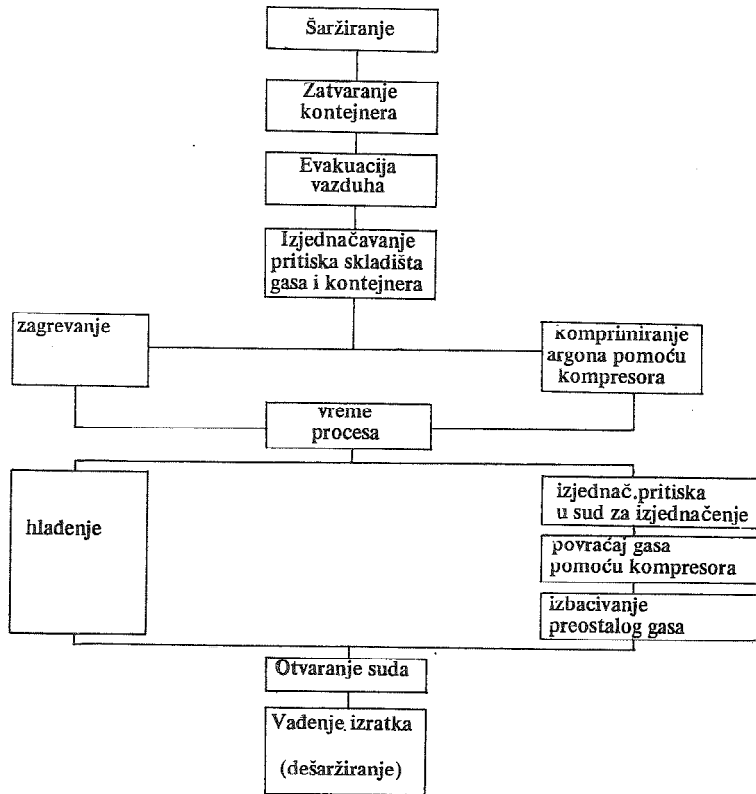
Kvalitet izradka i ekonomičnost izrade su kriterijum optimalnosti procesa.

Temperaturno—brzinski uslovi sa teorijskog aspekta obrade metala deformisanjem su od najvećeg značaja. Liveni izratci imaju krupnozrnastu metalografsku strukturu i poseduju nisku plastičnost što otežava oblikovanje svakog vida. Uticaj zagrevanja je veoma značajan i primaran

kod izbora brzine deformisanja, jer može se desiti pregoravanje, kao i pojava prskotina, pa i totalno prskanje izratka. Izbor tehnoloških parametara vršen je uzevši u obzir:

- uticaj elemenata hemijskog sastava materijala i njegova svojstva pri različitim temperaturama;
- oblik izratka podešen za izostatičko presovanje (jedan kom. grubo mehanički obraden a drugi kao odlivak);
- iskontrolisana mehanička svojstva i dr. odlivka prema pooštrenim metodama kontrole mnogih parametara;
- analiza oprcme i očekivani rezultati.

Proces vrućeg izostatičkog presovanja radnog kola može se predstaviti blok šemom:



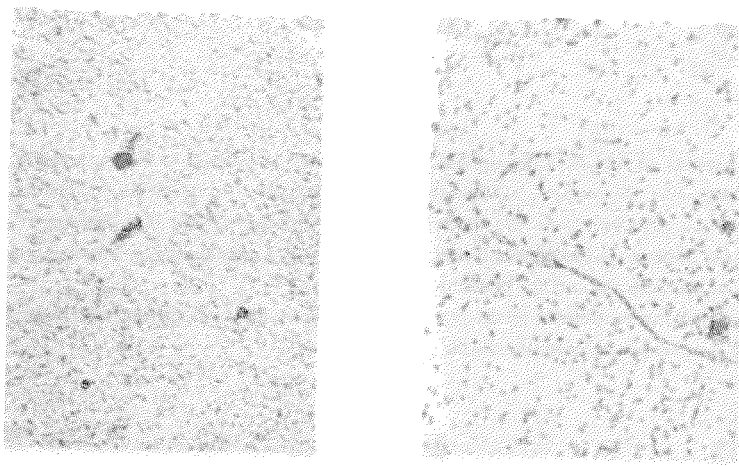
#### 4. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

a) Radno kolo havarijske pumpe za nuklearne elektrane od materijala 20X13 A je liveno i termički obrađeno (normalizovano i otpušteno).

- Tvrdća na površinama diska je 17 HRC
- Unutrašnji defekti su označeni zvezdicama na sl. 1.
- Mikrostruktura; visokopopuštena struktura – karbidne izlučevine, već skupljene u grube čestice, u feritnoj osnovi sl. 2a (uvećanje 500:1).

b) Radno kolo nakon snimljenih unutrašnjih defekata izloženo je izostatičkom presovanju i postignuti su sledeći rezultati:

- Tvrdća na površinama diska 52 HRC
- Tvrdća na glavčini 52 HRC
- Tvrdća u sredini preseka 50 HRC
- Unutrašnji defekti – penetranska metoda ih nije pokazala.
- Mikrostruktura: grube karbidne čestice u feritnoj osnovi. Granice pređašnjeg austenitnog zrna jasno ocrtane karbidnim izlučevinama, sl. 2b (uvećanje 500:1)



Sl. 2. Makrostruktura odlivka radnog kola: a) pre izost. presovanja; b) posle izost. presovanja.

Ono što se može uočiti odmah to je da je tvrdoća posle izostatičkog presovanja neobičajeno visoka što je neočekivano. Zato treba proširiti dalja istraživanja na više kvaliteta materijala i snimiti zateznu čvrstoću, granicu razvlačenja, izduženje, kontrakciju i udarnu žilavost, te nakon toga doneti zaključak.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanja su potvrdila da postupak izostatičkog presovanja otklanja unutrašnje makro i mikrodefekte u oblicima veoma pouzdano. Ostale parametre mehaničkih osobina treba obezbediti vođenjem tehnološkog procesa izostatičkog presovanja sa pravilnim izborom temperature radne sredine, pritiska i vremena trajanja procesa.

Svi parametri radnog kola havarijske pumpe su praktično obezbeđeni. Treba dodatno ispitati uzrok tolikog povećanja tvrdoće i kakav će biti korelacioni odnos granice razvlačenja i zatezne čvrstoće, a uzimajući u obzir i udarnu žilavost.

### Reference

- (1) Kolašnikov A.I. i dr.: Gorjačeje hidropresovanje metaličeskih materijalov, Moskva, „Mašinstrojenije“, 1977.
- (2) Černii JU.F. i dr.: Hidropresovanje instrumentalnih stalci, Kiev, „Tehnika“, 1987.
- (3) Balakin V.F. i dr.: Hidropresovanje trub, Kiev, „Tehnika“, 1986.
- (4) Gubkin S.I.: Teorija obrabotki metalov davleniem, Moskva, „Metalurgizdat“, 1947.
- (5) Raes H.D.B.: Hot isostatic press technology powder metalurgy, 1983, vol. 26, N<sup>o</sup> 4.
- (6) Grudev A.F. i dr.: Trenie i smaski pri obrabotke metalov davleniem, Spravočnik, Moskva, Metalurgija, 1982.
- (7) Anciferov V.N. i dr.: Zaimnaja difuzia i gomogenizacija v poroskovih materijalah, Moskva, Metalurgija, 1988.
- (8) Radni materijal sa učešća autora u svojstvu specijaliste za Gazostate i hidrostate u Harkovu, 1988.

### SUMMARY

The process of hot isostatic processing is presented as applied to the emergency pump impeller casting with the purpose of eliminating the micro and macro defects within the structure. The process also improves the mechanical characteristics of the material the expected values of which depend on the correct choice of temperature, applied working pressure, chemical composition of the material and the duration of the process.

Micro and macro defects could not be identified by the penetrating test method and therefore the process can be considered safe and reliable.

---

## 22 ЈУГОСЛОВЕНСКО СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

---

M. Sendić, I. Šušić \*)

### IZRADA OŽLJEBLJENIH VRATILA POSTUPKOM HLADNOG PROFILNOG VALJANJA

#### 1. UVOD

Osim spajanja mašinskih dijelova pomoću klinova, koriste se i ožljebljena vratila. U odnosu na spajanje klinovima, ožljebljena vratila prenose veće obrtne momente, bolja je centričnost, dužine glavčine mogu da budu manje i sl. Koriste se kod alatnih mašina, lokomotiva, automobila, avionskih motora, traktora, to jest u slučajevima jače opterećenih mašinskih dijelova i zahtjeva za tačnosti spajanja.

Ako primjenimo odgovarajuću tehnologiju i industrijski način proizvodnje dobivamo izmjenjive i relativno jeftine proizvode. Sama vratila se mogu uraditi na klasičan način, tj. odvalnim glodanjem ili diobenim postupkom i postupkom hladnog profilnog valjanja, a koji se u posljednje vrijeme sve više koristi.

#### 2. POSTUPAK HLADNOG PROFILNOG VALJANJA

Postupak hladnog profilnog valjanja je alternativni postupak postupku glodanja zupčanika i ostalih profila koji se mogu izrađivati glodanjem.

Šema postupka prikazana je na Sl. 1.

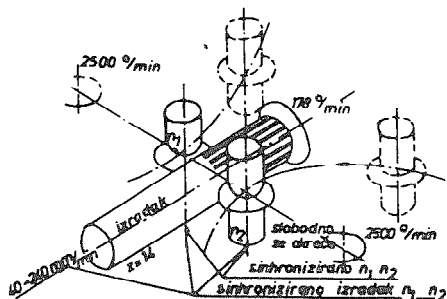
Kako se sa slike vidi izradak se nalazi upet između stezne glave i pneumatskog šiljka. Izradak ima obrtno i uzdužno posmično kretanje. Za utiskivanje ožljebljenja u izradak koriste se alati u obliku profiliranih valjaka.

---

\*) Mr Sendić Mirza, dipl.ing, šef Odjeljenja konstrukcije i tehnologije, RO Fabrika autodijelova "Mehanika" Derventa

Mr Šušić Ilija, dipl.ing, generalni direktor RO Fabrika autodijelova "Mehanika" Derventa





Sl. 1. Šema postupka hladnog profilnog valjanja

Oblik profila alata - rolne jednak je profilu žlijeba na izratku. Alati su uležišteni u dvije glave koje rotiraju sa 2500 o/min, a osim toga slobodno se obrću oko svoje ose. Broj obrtaja izratka zavisi od broja žljebova, a uzdužni pomak od profila žlijeba i tvrdoće materijala.

Ožljebljena vratila se rade sa ravnim bokovima prema standardu DIN 5481 ili sa evolventnim profilom prema standardima DIN 5480 i DIN 5482. Osim pomenutih standarda koji su najčešće u upotrebi, koristi se još čitav niz nacionalnih i fabričkih standarda. Izratci dobiveni postupkom hladnog profilnog valjanja odlikuju se velikom tačnošću oblika i dimenzija i malom površinskom hrapavošću. Postupak je 5 - 10 puta produktivniji od odvalnog glodanja uz veliku trajnost alata. Zbog manjeg prečnika uložnog materijala postupak dovodi do ušteda materijala. Usljed plastične deformacije dolazi do očvršćavanja površine izratka. Prema istraživanjima koja su data u radu [3] utvrđeno je da pri ovom postupku dolazi do povećanja tvrdoće i do 40 posto, a što zavisi od stanja materijala izratka, kontaktnih uslova između alata i izratka i brzine posmaka.

Zbog gore navedenih povoljnih karakteristika, postupak hladnog profilnog valjanja nailazi na sve veću primjenu.

### 3. PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE

Pri projektovanju tehnologije hladnog profilnog valjanja moramo da odredimo sljedeće:

- alat prema traženom profilu
- potreban prečnik izratka na mjestu valjanja
- posmak

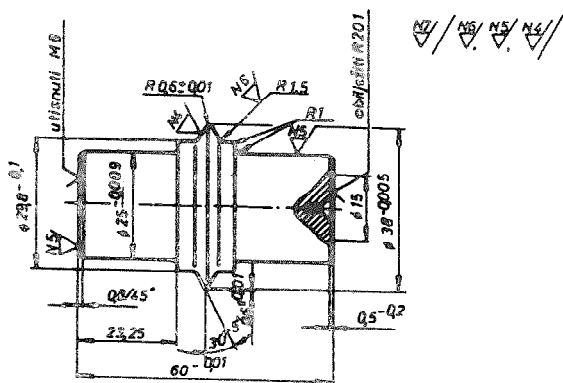
- Izbor alata prema traženom profilu

Kod projektovanja tehnologije za novi proizvod možemo da:

1. izbor alata prema traženim karakteristikama ožljebljenja prepustimo proizvođaču mašine ili isti, ako je u pitanju standardno ožljebljenje mi izvršimo na osnovu kataloga proizvođača

2. izvršimo konstrukciju alata prema traženom profilu, a samu izradu prepustimo proizvođaču alata.

Imajući u vidu poznate probleme sa uvozom, kao i tendencije supstitucije uvoznih alata i materijala domaćim, potrebno je prići drugoj varijanti obezbjeđenja alata. RO FAD već desetak godina ima izuzetno plodnu saradnju na ovom planu sa Industrijom alata Trebinje, i zajedničkim naporima napravljen je alat koji se kvalitetom i trajnosti pri eksploataciji približava uvoznim. Na Sl.2 je prikazan crtež alata - rolne za izradu ožljebljenja 50 x 55 DIN 5481.



Sl. 2. Crtež rolne

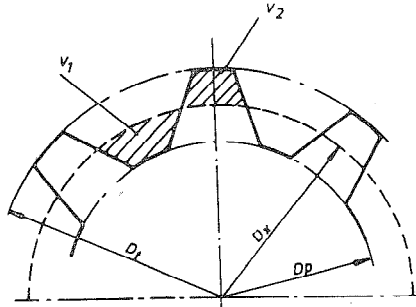
Trajnost alata je znatno povećana kada smo nakon kalenja izvršili gasno nitiranje. U RO FAD smo pokušali da alate deponiramo sa TiN, ali je uzorak bio mal da bismo mogli donijeti relevantne zaključke.

Daljnja poboljšanja postojanosti ovih alata sigurno idu u ovom smjeru.

- Određivanje potrebnog prečnika izratka na mjestu valjanja prema radu [4]

Kao što smo već napomenuli ožljebljena vratila mogu biti sa ravnim i evolventnim bokovima. Potreban prečnik izratka prije valjanja utvrdit ćemo na osnovu jednakosti volumena prije i poslije valjanja.

Slika ožljebljenja sa ravnim bokovima data je na Sl. 3, a odgovarajući proračun dat je u nastavku.



Sl. 3. Skica ožljebljenja sa ravnim bokovima

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 \cdot l = A_2 \cdot l$$

odnosno

$$A_1 = A_2$$

$$\frac{D_x^2 \cdot \pi}{4} = \frac{D_p^2 \cdot \pi}{4} + A_z \cdot z$$

$$A_z = \frac{D_t + D_p}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{2z} \cdot \frac{D_t - D_p}{2} = \frac{D_t^2 - D_p^2}{8z} \cdot \pi$$

$$\frac{D_x^2 \cdot \pi}{4} = \frac{D_p^2 \cdot \pi}{4} + \frac{D_t^2 - D_p^2}{8z} \cdot \pi \cdot z$$

$$D_x = \sqrt{D_p^2 + \frac{D_t^2 - D_p^2}{2}} = \sqrt{\frac{D_t^2 + D_p^2}{2}} \quad (1)$$

gdje je:

$D_t$  - tjemeni prečnik ožljebljenja

$D_p$  - podnožni prečnik ožljebljenja

Za evolventno ožljebljenje uz određene aproksimacije možemo postaviti relaciju

$$\frac{D_x^2 \cdot \pi}{4} = \frac{D_p^2 \cdot \pi}{4} + S_w \cdot \frac{(D_t - D_p)}{2} \cdot z$$

čijim rješavanjem dolazimo do obrasca

$$D_x = \sqrt{D_p^2 + \frac{2 \cdot z \cdot S_w}{\pi} (D_t - D_p)} \quad (2)$$

gdje je:

$D_t$  - tjemeni prečnik ožljebljenja

$D_p$  - podnožni prečnik ožljebljenja

$S_w$  - debljina zupca

Ovako proračunate vrijednosti prečnika prije valjanja, treba radi učinjenih pretpostavki u toku proračuna provjeriti prilikom izrade nulte serije na mašini i po potrebi korigovati.

Prečnik izratka prije valjanja može se odrediti i korištenjem empirijskog obrasca do koga smo došli ispitivanjem većeg broja raznih tipova već radenih ožljebljenja.

$$D_x = D_p + 0,465 (D_t - D_p) + C \quad (3)$$

gdje je:

$D_p$  - podnožni prečnik ožljebljenja

$D_t$  - tjemeni prečnik ožljebljenja

$C$  - veličina ovisna o tvrdoći izratka

$$C = (HB - 250) \cdot (1,5 \div 2) \mu m \quad (4)$$

- Određivanje posmaka

Posmak izračunavamo prema formuli:

$$s = \frac{n \cdot s_z}{z} \quad (5)$$

gdje je:

$s$  mm/min - posmak izratka

$n$  o/min - broj obrtaja alata - molnica

$s_z$  mm/zubu - posmak po zubu

$z$  - broj zubi izratka

Posmak po zubu  $s_z$  ima vrijednost 0,6 + 1,5 mm a zavisno od tvrdoće izratka i dubine profila.

#### 4. ZAKLJUČAK

Ovim radom učinjen je pokušaj da se jedan veći krug stručnjaka upozna sa jednim relativno novim postupkom izrade ožljebljenih vratila, zupčanika i sličnih profila, a onima koji ovaj postupak poznaju, da prenesemo iskustva do kojih smo došli u RO FAD kod projektovanja tehnologije izrade za dati proizvod.

Na osnovu izloženog možemo zaključiti slijedeće:

1. Postupak hladnog profilnog valjanja je izuzetno produktivan postupak, trajnost alata je velika, čime dobivamo izmjenljive i relativno jeftine proizvode
2. Izratci dobiveni ovim postupkom odlikuju se velikom tačnošću oblika i dimenzija, malom površinskom hrapavošću i površinom do 40% tvrdom od osnovnog materijala
3. Zbog manjeg prečnika uložnog materijala i manjeg obima prethodne obrade postupak dovodi do znatnih ušteda.

#### L I T E R A T U R A

- [1] Stanković P., Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina II, Obrada metala bez rezanja, Naučna knjiga, Beograd, 1975.
- [2] Vitas D., Trbojević M., Mašinski elementi II, Naučna knjiga, Beograd, 1973.
- [3] Caparin D., Promjena tvrdoće hladno profilno planetarno valjanih izradaka u ovisnosti o promjeni režima rada, 9. Međunarodno savjetovanje BIAM, Zagreb, 1988.
- [4] Sendić M., Diplomski rad, Mašinski fakultet, Sarajevo, 1978.

M. Sendić, I. Šušić

#### MANUFACTURING OF GROOVED SHAFTS BY TREATMENT OF COLD PROFILE ROLLING

Conecting of machine elements with grooved shafts and flaunges have more advantages and broad aplication in car aircraft, tractor and industry of tool-machine. We can this shafts produce by milling with division procedure, but treatment of cold rolling have more favorabla carasteristics for product and lower price and therefore moch more aplication.

DIMENZIJE KALUPNE ŠUPLJINE ZA IZRADU ZUPČANIKA

OD PLASTOMERA UBRIZGAVANJEM

D.Lazarević, Lj. Janković\*

1. UVOD

Proces ubrizgavanja plastomera sastoji se u zagrevanju granulata plastomera do rastopine, zatim, njeno dovoljno brzo ubrizgavanje u kalupnu šupljinu propisane temperature. U kalupnoj šupljini deo od plastomera se hladi odvođenjem toplote, a potom dovoljno očvrso deo vadi iz kalupne šupljine.

Pri hladjenju dela od plastomera dolazi do zapreminske kontrakcije - skupljanja. Skupljanje i rasipanje skupljanja utiču na tačnost i preciznost mera debla od plastomera, odnosno od toga zavisi tolerancija dela. Međutim, predvidljivost skupljanja zahteva mnogo istraživanja. U okviru ovog rada posebna pažnja biće posvećena postizanju tačnih dimenzija i tačnosti evolventnog profila zupčanika od plastomera.

2. DIMENZIJE KALUPNE ŠUPLJINE

Radi skupljanja, koje se javlja pri hladjenju plastomera, dolazi do promena dimenzija zupčanika kao i oblika evolventnog profila zupca u odnosu na dimenzije kalupne šupljine.

Na osnovu podataka o plastomeru i na osnovu tačnog utvrdjenog ponašanja plastomera pri ubrizgavanju, uz korišćenje opštih karakteristika evolventnih zupčanika, predloženi su sledeći načini odredjivanja dimenzija kalupne šupljine kako bi se dobio ispravan zupčanik |1|, |2|;

a) Kao osnova za odredjivanje dimenzija kalupne šupljine uzima se korigovani modul  $m'$  čija je vrednost promenjena za veličinu skupljanja u odnosu na zadanu vrednost:  $m' = m(1 \pm \frac{\delta}{100})$ . (1)

\*) Dr. DRAGOLJUB LAZAREVIĆ, dipl. ing., asistent Mašinskog fakulteta u Nišu,

Dr. LJUBOMIR JANKOVIĆ, dipl. ing., vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu

Sve mere kalupne šupljine se proračunavaju prema ovom modulu  $m'$  i uglu dodirnice  $\alpha'_0 = 20^\circ$ . S obzirom na taj modul mere kalupne šupljine su za  $x=0$ .

$$\begin{aligned} - \text{podeoni krug:} & D' = m' \cdot z \\ - \text{podnožni krug:} & D'_i = D' - 2 \cdot 1,25 m' \\ - \text{temeni krug:} & D'_s = D' + 2 \cdot m' \\ - \text{osnovni krug:} & D'_0 = D' \cdot \cos \alpha'_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Debljina zupca na proizvoljno zadanom mestu:

$$b'_y = 2 \cdot R_y \left( \frac{\pi}{2z} + \text{inv} \alpha'_0 - \text{inv} \alpha'_y \right) \quad (3)$$

gde je  $\cos \alpha'_y = \frac{D'_0}{D'_y}$

b) kod ovog načina dimenzije kalupne šupljine se određuju na osnovu korigovanog modula  $m' = m(1+S/100)$  i ugla dodirnice

$$\alpha'_0 = \alpha_0 \left( 1 \pm \frac{S}{100} \right) = 20^\circ \left( 1 \pm \frac{S}{100} \right),$$

Dimenzije kalupne šupljine:

$$\begin{aligned} - \text{podeoni krug} & : D' = m' \cdot z \\ - \text{podnožni krug} & : D'_i = D' - 2 \cdot 1,25 m' \\ - \text{temeni krug} & : D'_s = D' + 2 \cdot m' \\ - \text{osnovni krug} & : D'_0 = D' \cdot \cos \alpha'_0 \end{aligned} \quad (4)$$

Debljina zupca na proizvoljnom prečniku:

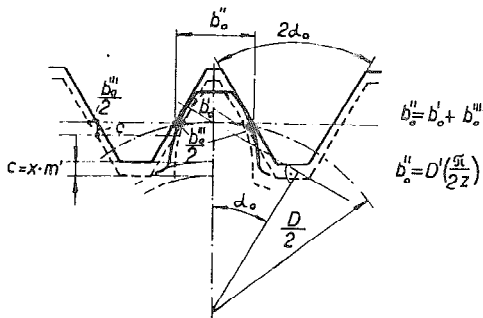
$$b'_y = 2 \cdot R_y \left( \frac{\pi}{2z} + \text{inv} \alpha'_0 - \text{inv} \alpha'_y \right) \quad (5)$$

gde je  $\cos \alpha'_y = D'_0 / D'_y$

c) kada se radi o plastomerima koji imaju veći koeficijent skupljanja, dimenzije kalupne šupljine se izračunavaju sa modulom  $m' = m(1+S)$  uz odgovarajuću korekturu zubaca primenom evolventne funkcije (sl.1).

Debljina zubaca izražena pomoću evolventne funkcije za slučaj kada je osnovni profil odmaknut za  $c = m \cdot x$ ; gde je  $x$  faktor korekture:

$$b'_y = 2 \cdot R_y \left( \frac{\pi}{2z} \pm \frac{2x}{z} \text{tg} \alpha'_0 + \text{inv} \alpha'_0 - \text{inv} \alpha'_y \right) \quad (6)$$



Sl.1. Debljina zupca pri pomeranju

Na mestu gde je  $D_y = D'$  ima se debljina zupca:

$$b''_0 = D' \left( \frac{\pi}{2z} \right) = b'_0 + b''_0 \quad (7)$$

gde je:  $D' = m' \cdot z$ ;  $b'_0 = b'_y$  ( $D_y = D'$ )

Naknadno povećanje debljine zupca u kalupnoj šupljini usled skupljanja:

$$b'''_0 = b''_0 \cdot \frac{S}{100} \quad (8)$$

Prema sl.1.  $b'''_0$  se izračunava:

$$b'''_0 = 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot x \cdot m' \quad (9)$$

Na osnovu jednačina (7), (8), (9) ima se

$$2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot x \cdot m' = b''_0 \cdot \frac{S}{100} = D' \cdot \frac{\pi}{2z} \cdot \frac{S}{100} \quad (10)$$

odnosno:

$$2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot x \cdot m' = \frac{m' \cdot z \cdot \pi \cdot S}{100 \cdot 2 \cdot z} \quad (11)$$

Nakon sredjivanja dobija se izraz za izračunavanje faktora korekcije  $x$  uzimanjem u obzir skupljanje;

$$x = \frac{\pi \cdot S}{400 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0} \quad (12)$$



Ovom fakturu korekture odgovara povećanje mera kalupne šupljine za izradu zupčanika.

Odgovarajući linearni bočni zazor ( $f_0$ ) može da se ostvari uzimanjem još u obzir faktor korekcije  $x_f$ :

$$x_f = \frac{f_0}{4 \cdot \sin \alpha_0 \cdot m} \quad (13)$$

Preporučuje se da bočni zazor ima vrednost  $f_0 = m/12,5$ , ili da se bira u zavisnosti od modula i kvaliteta izrade [1].

d) za odredjivanje dimenzije kalupne šupljine, za izradu zupčanika, može se uzeti u razmatranje i odredjivanje svih dimenzija kalupa pomoću korigovanog modula  $m' = m(1 + S/100)$  i  $\cos \alpha_0' = \cos \alpha_0 (1 + S/100)$ .

Uz pomoć korisničkog programa "LAMA 16C" omogućeno je lako variranje pojedinih veličina zupčanika, njihovo crtanje, uporedjivanje i praćenje kako promena pojedinih parametara zupčanika utiče na samu geometriju i dimenzije zupčanika. Korišćenjem ovog programa omogućeno je unapred odlaćivanje pojedinih varijanti, i samim tim je sprečena nepotrebna izrada pojedinih izmenljivih kalupnih šupljina u cilju eksperimenta [3].

Na osnovu navedenih razmatranja, a u cilju eksperimentalnog utvrđivanja najoptimalnijih dimenzija kalupne šupljine za izradu zupčanika, izradjeni su sledeći izmenljivi kalupni umeci sa dimenzijama:

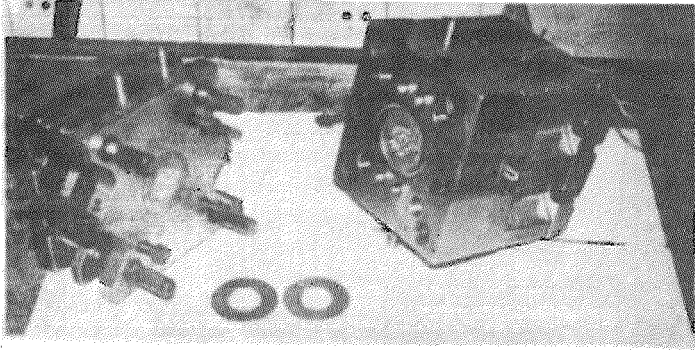
1.  $m=1,50$  [mm] ,  $\alpha_0 = 20^\circ$  ,  $z=20$  zuba ,  $x=0$  ,
2.  $m=1,53$  [mm] ,  $\alpha_0 = 20^\circ$  ,  $z=20$  zuba ,  $x=0$  ,
3.  $m=1,53$  [mm] ,  $\alpha_0 = 20,40^\circ$  ,  $z=20$  zuba ,  $x=0$  ,
4.  $m=1,53$  [mm] ,  $\alpha_0 = 19,60^\circ$  ,  $z=20$  zuba ,  $x=0$  ,

Uz pomoć korisničkog programa "LAMA 16C" nacrtani su odgovarajući zupčanici u razmeri 5:1. U sredini zupčanika nacrtan je odgovarajući zubac u razmeri 25:1 [3].

### 3. SPROVODJENJE EKSPERIMENTA

Za sprovođenje eksperimentalnih istraživanja u okviru ovog rada napravljen je specijalni alat za ubrizgavanje zupčanika od plastomera (sl,2), Alat je konceptijski izveden sa izmenljivim

kalupnim umecima, koji omogućavaju da se ubrizgavaju cele familije različitih zupčanika. Konstruktivno izvođenje alata te sa



Sl.2. Eksperimentalni alat

automatskim odkidanjem ulivnog sistema, Alat ima tri ravni razdvajanja. Rastopljen plastomer ulazi u formu kalupne šupljine kroz tri tačkasta ušća koja omogućavaju lako odvajanje ulivnog sistema od gotovog zupčanika.

Izrada izmenljivih kalupnih umetaka obavljena je na mašini za elektroeroziju sa žičanom elektrodom,

Eksperimentalna istraživanja u okviru ovoga rada vršena su na automatskoj ubrizgavalici "BELMATIK 50/28R"-Belišće.

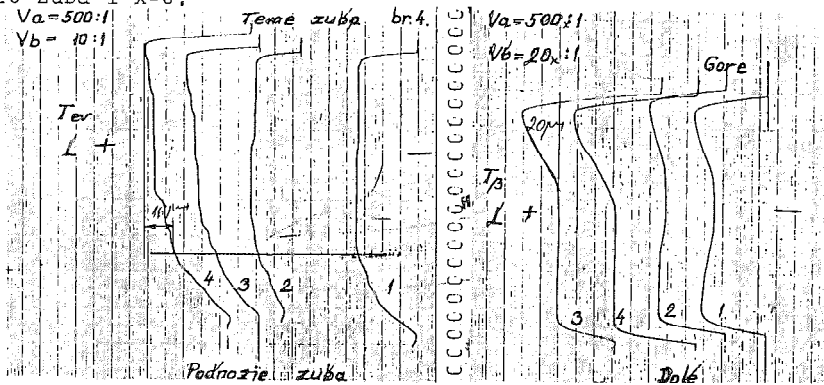
Za izradu zupčanika ubrizgavanjem korišćen je HOSTAFORM (proizvod Nemačke firme HOECHST). HOSTAFORM u poređenju sa drugim plastomerima ima veliku tvrdoću, krutost i dobru dimenzionalnu stabilnost gotovih delova. Sam proizvođač HOSTAFORM-a daje detaljan pregled asortimana, fizičkih i mehaničkih svojstava kao i uputstva o načinu i uslovima prerade.

#### 4. ANALIZA DIMENZIJA I OBLIKA DOBIJENIH ZUPČANIKA OD PLASTOMERA

Odgovarajućim postupcima kontrole dobijenih zupčanika od plastomera izvršena je provera njihovih dimenzija i oblika, sa ciljem utvrđivanja najoptimalnijih mera kalupne šupljine kako bi se dobio najtačniji zupčanik.

Na mašini "KLINGELUBERG" za kontrolu zupčanika dobijeni su zapisi pri kontroli profila evolvente (odnosno kontrola ugla dodirnice i prečnika osnovnog kruga) i zapisi pri kont

troli evolvente i bočne linije za zupčanik koji je dobijen u kalupnoj šupljini čije su dimenzije;  $m=1,53$  mm,  $\alpha_0=19,6^\circ$ ,  $z=20$  zuba i  $x=0$ , Sl.3.



Sl.3. Zapisi pri kontroli evolvente zupca

Odgovarajući rezultati koji su dobijeni pri kontroli zupčanika dati su u tabeli 1.

Tabela 1.

Red. br.	mere zupčanik	$D$ [mm]	$D_s$ [mm]	$D_i$ [mm]	$W_k$ [mm]	$\bar{f}_D$ [mm]	$\bar{f}_\alpha$ [°]	$D_0$ [mm]	$\alpha$ [°]	$b_t$ [mm]	$L$ [mm]	$f_\beta$ [°]	$A_\beta$ [mm]	$e$ [mm]
1	$m=1,5, \alpha=20^\circ$ $z=20, x=0$	30	33	26,25	11,491	0	0	28,190	$20^\circ$	2,323	3,00	0	0	0
2	$m=1,53, \alpha=20^\circ$ $z=20, x=0$	-	32,131	25,725	11,242	-0,678	$+3^\circ 46' 5''$	27,512	$16^\circ 14'$	2,306	3,004	$2^\circ 6' 27''$	0,046	0,020
3	$m=1,53, \alpha=20,4^\circ$ $z=20, x=0$	-	32,948	26,242	11,434	-0,204	$+1^\circ 08' 2''$	27,986	$18^\circ 51' 56''$	2,328	3,019	$1^\circ 24'$	0,036	0,022
4	$m=1,53, \alpha=20^\circ$ $z=20, x=0$	-	32,944	26,240	11,488	-0,051	$0^\circ 17'$	28,139	$19^\circ 43'$	2,337	3,023	$1^\circ 10'$	0,028	0,018
5	$m=1,53, \alpha=19,6^\circ$ $z=20, x=0$	-	32,982	26,242	11,490	-0,030	$0^\circ 10'$	28,160	$19^\circ 50'$	2,343	3,010	$1^\circ 12'$	0,029	0,022

Pod rednim brojem 1 date su teorijske dimenzije zupčanika, koje bi trebale da se ostvare. Pod rednim brojevima 2,3,4 i 5 date su dimenzije dobijenih zupčanika od plastomera, čije su dimenzije kalupne šupljine urađjene prema vrednostima date u odgovarajućim rubrikama.

U tabeli 1. odgovarajuće oznake imaju sledeća značenja:

- |  |   |
|--|---|
| $D$ - prečnik podeonog kruga,                    | $f_\alpha$ - odstupanje ugla dodirnice,   |
| $D_s$ - prečnik temenog kruga,                   | $\alpha$ - ugao dodirnice,                |
| $D_i$ - prečnik podnožnog kruga,                 | $b_t$ - tetivna debljina zupca,           |
| $D_0$ - prečnik osnovnog kruga,                  | $L$ - dužina zubca,                       |
| $W_k$ - mera preko zubaca ( $k=3$ ),             | $f_\beta$ - odstupanje ugla bočne linije, |
| $\bar{f}_D$ - odstupanje prečnika osnovnog kruga | $A_\beta$ - odstupanje bočne linije,      |
|  | $e$ - ekscentričnost,                     |

Odgovarajućim merenjem, utvrđeno je da je postignuti kvalitet prečnika temenog kruga IT8, za zupčanik čije su dimenzije kalupnih umetaka pod rednim brojem 3 i 4, IT6 za zupčanik čije su dimenzije kalupnog umetka date pod rednim brojem 5 (tabela 1).

Tolerancijsko polje za meru preko zubaca, za izradni zupčanik (r.br.1) je  $T_w=20 \mu\text{m}$ , a odgovarajuća odstupanja su  $A_{wd}=56 \mu\text{m}$  i  $A_{wg}=-36 \mu\text{m}$ , i to za bočni zazor  $J_{n\text{max}}-J_{n\text{min}}=122-61=61 \mu\text{m}$  (JUS.M.Cl.034).

Kvalitet centričnosti ( $A_r$ ) svih zupčanika pod rednim brojem 2,3,4 i 5 su 5 ili 6 (JUS.M.Cl.035).

Veličina tolerancijskog polja za debljinu zupca posmatranog zupčanika  $T_s=20 \mu\text{m}$ , a odgovarajuća odstupanja su  $A_{sg}=-36 \mu\text{m}$  i  $A_{sd}=-56 \mu\text{m}$ .

Odstupanje bočne linije, za izradjene zupčanike čiji su kalupni umeci pod rednim brojem 4 i 5 je  $A=28 \mu\text{m}$ , što odgovara kvalitetu 9 (JUS.M.Cl.033).

Postignuti kvalitet evolvente kod izradjenih zupčanika sa kalupnim umecima, pod rednim brojem 4 i 5 je 7 i 6 (JUS.M.Cl.035),

Upoređujući rezultate datih u tabeli 1, može se zaključiti da se postignute vrednosti za prečnike osnovnih krugova ( $D_o$ ) i uglove dodirnice ( $\alpha_o$ ) za zupčanike pod rednim brojem 4 i 5 dobro se slažu sa računskim vrednostima u rubrici broj 1.

Analizirajući ostvarene mere zupčanika od plastomera, može se zaključiti sledeće; optimalne mere zupčanika ( $m=1,5 \text{ mm}$ ,  $\alpha_o=20^\circ$ ,  $z=20$  zuba,  $x=0$ ) postižu se kalupnim šupljinama čije su dimenzije date pod rednim brojevima 4 i 5, tj. pri  $m'=1,53 \text{ mm}$ ,  $\alpha_o=20^\circ$ ,  $z=20$  zuba,  $x=0$  i pri  $m'=1,53 \text{ mm}$ ,  $\alpha_o=19,6^\circ$ ,  $z=20$  zuba i  $x=0$ .

## 5. ZAKLJUČAK

U okviru rada predloženo je više načina za određivanje dimenzija kalupne šupljine, kako bi se dobio najispravniji zupčanik. Uz pomoć korisničkog programa "LAMA 16C" omogućeno je lako variranje pojedinih parametara zupčanika, njihovo crtanje, upoređivanje, i praćenje kako promene pojedinih parametara zupčanika utiče na samu geometriju i dimenzije zupčanika. Varira-

njem izmenljivih kalupnih umetaka i potom odgovarajućim postupcima merenja i kontrole, dobijenih zupčanika od plastomera, vršena je provera njihovih dimenzija i utvrđeno je da se optimalne mere zupčanika od plastomera ( $m, \alpha_0 = 20^\circ, z, x=0$ ) mogu postići kalupnim šupljinama čije su dimenzije:

$$m' = (1 + \frac{S}{100})m, \alpha'_0 = (1 - \frac{S}{100})\alpha_0, z \text{ i } x=0 \text{ i pri}$$

$$m' = (1 + \frac{S}{100})m, \alpha'_0 = \alpha_0 = 20^\circ, z, \text{ i } x=0,$$

#### R E F E R E N C E

- [1] JOISTEN S., Herstellung von Kunststoff-Zahnrädern durch Spritzgießen, Plast, 1975.
- [2] JOISTEN S., Untersuchungen zur Herstellung von Kunststoff-Zahnrädern durch Spritzgießen Dissertation, TH Aachen, 1973.
- [3] LAZAREVIĆ D., Istraživanje metoda proračuna i projektovanja tehnologije izrade elemenata od plastomera ubrizgavanjem, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš, 1988.

D.LAZAREVIĆ, LJ.JANKOVIĆ

DIMENSIONS OF THE MOULD HOLLOW FOR MAKING  
PLASTOMERIC GEARS BY INJECTION

#### S u m m a r y

This paper suggests many methods for determining dimensions of the mould hollow in order to obtain the most accurate gear. By using the users' programme "LAMA 16C" it is possible to fluctuate slightly certain gear parameters, their drawing, comparison and tracing of the parameters change affecting the geometry and gear parameters. After changing replaceable mould inserts in experimental tools and after applying corresponding procedures of measurement and control of the obtained plastic gears their dimensions have been checked in order to determine the optimal dimensions of the mould hollow as the most prominent factor of the desired shape.

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

---

Todorovski Ivko +  
Marković Živorad +

ISPITIVANJE KVALITETA REPARATURNO NAVARENIH  
VALJAKA ZA TOPLO VALJANJE LIMOVA

1. U V O D

Prateći najnovija kretanja u našoj privredi "Zmaj" -Smederevo u saradnji sa "Metalurškim kombinatom"-Smederevo u želji da proširi svoju osnovnu delatnost uveo je program za reparaciju metalurških valjaka. U tom cilju je pre par godina uspostavljena saradnja sa jednim od vodećih švedskih proizvođača visoko produktivnih automata za navarivanje metalurških valjaka, -SARCLAD - Engleska.

Ako se zna da se u Jugoslaviji uvoze valjci za potrebe čeličana, hladnih i toplih valjaonica itd., to je saradnja sa MK- Smederevo dovela do konkretnih rezultata:

- zamena uvoza metalurških valjaka;
- smanjenja troškova proizvodnje;
- smanjenja troškova remonta;
- lakšeg planiranja remonta.

Nakon probnog navarivanja nekoliko desetina pohabanih valjaka i njihove probne proizvodnje u toploj valjaonici MK Smederevo, bilo je neophodno proveriti primenjenu tehnologiju navarivanja i konstatovati dali je došlo do bitnih promena u sastavu i mehaničkim osobinama materijala valjaka. Ova ispitivanja je uradila OOUR "Laboratorij<sup>um</sup> i osiguranje kvaliteta" koja u sastavu RO "Zastava-Jugo automobili" -Kragujevac bavi se metalurškim

- 
- + Todorovski Ivko, dipl. maš. inž. vodeći ispitivaš za zavarivanje, OOUR "Laboratorijum osiguranje kvaliteta" -Kragujevac
  - + Živorad Marković, dipl. maš. inž. glavni tehnolog za zavarivanje, RO "Zmaj" -Smederevo.

i hemijsko tehnološkim ispitivanjima i istraživanjima. Rezultati ovih ispitivanja biće prikazani u daljem tekstu ovog rada.

## 2. PRIMENJENA TEHNOLOGIJA REPARATURNOG NAVARIVANJA

U toku prerada slabova, valjci koji su grupisani u pojedinim stanicama, imaju dvostruku ulogu: da valjaju slabove i da ih guraju između sebe. Pri ovome na radnim površinama valjaka dolazi do pojava mrežaste strukture prslina i do delimičnog habanja istih površina. Prsline nastaju kao rezultat termičkih ciklusa i visokih pritisaka koji vladaju na radnim površinama a do habanja valjaka dolazi kao rezultat stalnog trenja između valjaka i slabova. Nakon prerade određene količine čelika ili pojave dubljih prslina metalurški valjci se nose na popravku, odnosno reparaturno navarivanje.

Prva operacija u procesu reparacije valjaka je utvrđivanje oblika i dimenzija najvećih prslina. Ovo se radi defekstoskopskim metodama bez razaranja: fero-fluks, magnetofluks i ultrazvuk.

Mašinskom obradom -struganjem, uklanja se osnovni materijal valjaka do dubine najdublje prsline ali uglavnom ne dublje do 1/3 debljine stabla valjka. Za ovo se koristi strug: ADA POTISJE PA 900/6000 za mase radnih komada do 5000 kg.

Ovako pripremljen valjak unosi se u peć gde se vrši predgrevanje valjaka, odnosno priprema za navarivanje. U zavisnosti od materijalake valjaka i debljine stabla valjka, temperatura predgrevanja se kreće od 270÷420°C, vreme zagrevanja 3÷7 sati, a brzina zagrevanja je do 100°C na sat.

Predgrejan valjak se stavlja na radni sto mašine za navarivanje. Postupak navarivanja je EPP. Engleski proizvođač visoko produktivnih automata za navarivanje "SARCLAD", za ovakvu ili sličnu vrstu navarivanja preporučuje svoju mašinu za navarivanje TIP MM 5 sa osnovnim karakteristikama:

- maksimalna dužina valjka do 4000 mm,
- prečnik navarivanja od 200÷ 1000 mm,
- maksimalna masa valjka do 5000 kg,
- maksimalna jačina struje navarivanja do 1100 A,
- dve glave za navarivanje samogučnošću navarivanja jednostrukom ili dvostrukom žicom - TWIN postupak.

Nakon samog postupka navarivanja, koji se uglavnom sastoji iz dve operacije, navarivanja međusloja - PUFER-a i tvrdog sloja - HARD, valjak se ponovo unosi u peć kako se bi se uradila njegova naknadna termička obrada odnosno uklonili zaostali naponi od zavarivanja i izvršila termička obrada tvrdog sloja radi dobijanja odgovarajuće tvrdoće 300+ 400 HB. Ciklus naknadne termičke obrade se sastoji u sledećem:

- vreme termičke obrade 10+ 14 sati
- temperatura zagrevanja od 525+620°C
- brzina zagrevanja max. do 50°C na čas.

Ovako zagrejan valjak se drži još oko 4 sata na temperaturu popuštanja, nakon čega se hladi zajedno sa peći do 200°C a dalje do sobne temperature zamotan u azbestne čaršave.

Termički obrađen valjak, ponovo se vraća na strugarsku obradu gde se dovodi na konačne - tehničkom dokumentacijom date dimenzije. Nakon ovoga ponovo se valjak ispituje defektoskopskim metodama bez razaranja kako bi se konstatovalo da na radnoj površini nema pbslina. U poslednje vreme kao završna obrada samih valjaka pre puštanja u proizvodnju izvodi se peskarenje pomoću čeličnih kuglica čime se donekve vrši relaksacija samih valjaka a ujedno se dobija željeni kvalitet radne površine ( tekstura) valjaka.

### 3. METALURŠKA ISPITIVANJA

Nakon jednogodišnjeg rada i preradenih nekoliko desetina hiljada tona čelika u Toploj valjaonici MK -Smedervo iz procesa prerade slabova uzeta su tri valjka dimenzija  $\varnothing$  500x2000 mm. iz najopterećenijih sekcija kako bi se ispitala metalurške osobine materijala navarenih valjaka i eventualno konstatovala određena odstupanja u materijalu valjaka. Prema tehničkoj dokumentaciji, stablo valjko je izrađeno od čelika Č.5430. Za prikazanu tehnologiju navarivanja kao dodatni materijali korišćeni su: elektrodne žice i praškovi za EPP zavarivanje domaćeg proizvođača i to: "Železare"-Jasenice. Za među sloj korišćena je nisko ugljenična nelegirana žica sa oznakom EPP 3 u kombinaciji sa praškom EP 55, dok je za tvrdi sloj korišćena visoko legirana elektrodna žica sa oznakom EPPCr6 u kombinaciji sa praškom EP 55. Prečnik žice za navarivanje oba sloja je bio 3±5 mm.



## 3.1. HEMIJSKI SASTAV

Kako bi se odredio sastav materijala valjaka izvršena je hemijska analiza pojedinih slojeva na valjcima a dobijeni rezultati prikazani su u tabeli T.1.

TABELA T.1. HEMIJSKI SASTAV MATERIJALA VALJAKA

		%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo
OSNOVNI MATERIJAL	Č 5430 JUS.CB9 021	0,32-0,40	—	0,50-0,80	0,90-1,20	0,90-1,20	0,15-0,30
	Uzorak	1. 0,40	—	0,70	1,10	1,10	0,20
		2. 0,40	—	0,64	1,21	1,25	0,20
		3. 0,40	—	0,78	1,17	1,10	0,20
MEĐUSLOJ - PUFER -	Žica EPP 3 JUS.CH3 053 Prašak EP 55 DIN. 8557.	0,08-0,11	0,20-0,75	0,35-1,50	—	—	—
	Uzorak	1. 0,08	0,30	0,78	0,14	0,16	0,02
		2. 0,08	0,40	0,99	0,11	0,20	0,03
		3. 0,06	0,37	0,88	0,10	0,17	0,03
TVRDI SLOJ - HARD -	Žica EPPCr6 JUS.C.H3. 053	0,10	0,25	0,70	7,0	0,35	—
	Uzorak	1. 0,07	0,30	0,51	5,8	0,39	0,46
		2. 0,06	0,30	0,79	7,10	0,36	0,48
		3. 0,06	0,30	0,71	7,0	0,35	0,50

Rezultati hemijske analize valjaka pokazuju da:

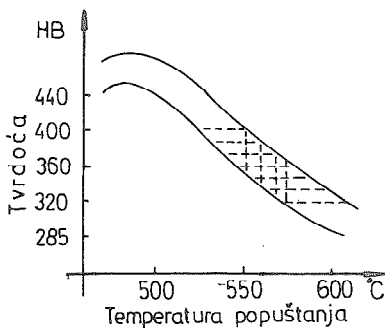
- osnovni materijal, odnosno stablo valjka po svom sastavu zadovoljava zahteve standarda JUS C.B9.021 za čelik Č.5430
- međusloj (pufer) je sastavljen od niskougljeničnog čelika a dobijeni rezultati odgovaraju onima koje daje proizvođač u svom katalogu,
- tvrdi sloj (HARD) je sastavljen od legiranog čelika na bazi Cr-Ni-Mo, a dobijeni rezultati odgovaraju onima koji daje proizvođač u svom katalogu.

## 3.2. TERMIČKA OBRADA VALJAKA

Na osnovu poznatog hemijskog sastava valjaka, osnovnih dimenzija valjaka i na osnovu poznatih empirijskih obrazaca i dijagrama termičke obrade za pojedine grupe legiranih čelika određena je termička obrada valjaka pre i posle navarivanja.

Za određivanje temperature predgrevanja korišćen je empirijski obrazac D. Sefarijana za čelike za poboljšanje. Poznavajući hemijski sastav osnovnog materijala i debljinu valjaka (oko 500 mm.), dobijena je temperatura predgrevanja  $t_p \approx 385^{\circ}\text{C}$ .

Za određivanje ciklusa termičke obrade valjaka nakon navarivanja vrlo je važno znati stanje isporuke materijala valjaka, hemijski sastav tvrdog sloja i željene njegove mehaničke karakteristike nakon termičke obrade, kao i poznavanje ili posedovanje empirijskih dijagrama stanje za visoko legirane čelike. Prema tehničkoj dokumentaciji, valjci se izrađuju uopšte kovanjem nakon čega se termički obrađuju, kaljenje i popuštanje. Temperatura popuštanja za čelik Č.5430 je od  $540\div 680^{\circ}\text{C}$ . S obzirom da se želi postići visoka tvrdoća na radnoj površini valjka, to poznavajući hemijski sastav tvrdog sloja i na osnovu empirijskih dijagrama stanja (popuštanja) za čelike sličnog sastava određena je temperatura popuštanja sa željom da se postigne tvrdoća od  $300\div 400$  HB.



Sl.1. Dijagram popuštanja za čelike sa hemijskim sastavom:

% C	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo
≤ 20	≤ 1,7	≈ 6,0	≈ 0,5	≈ 0,7

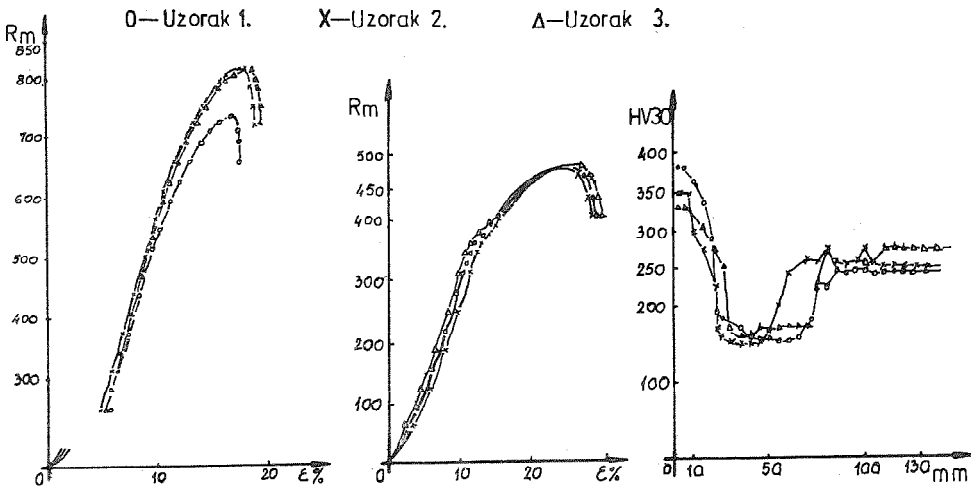
Na osnovu dijagrama i na osnovu eksperimentalno potvrđenih rezultata kao optimalna temperatura popuštanja navarenih valjaka primenjuje se  $t_{po} = 550 \pm 570^{\circ}\text{C}$  pri čemu se dobija tvrdoća radne površine od 320-400 HB.

### 3.3. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE MATERIJALA

Kod sva tri valjka na različitim mestima i iz različitih slojeva po poprečnom preseku rađene su po tri epruvete za ispitivanje mehaničkih ispitivanja materijala. Prikazane karakteristike materijala u ovom radu predstavljaju srednje vrednosti najznačajerih slojeva na valjcima. Treba istaći da se od tvrdog sloja nisu mogle raditi ni mikroeprovete jer je bio pun prslina i male debljine, pa se na njemu samo merila tvrdoća i iz nje preračunavala zatezna čvrstoća. Rezultati merenja mehaničkih karakteristika materijala valjaka dati su tabelarno u tabeli T.2 i prikazani su dijagramima na slikama 2, 3 i 4.

TABELA T.2. MEHANIČKE OSOBINE MATERIJALA VALJAKA

		$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_p$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %	Z %	$A_v$ J	HB 10/3000/20	
OSNOVNI MATERIJAL	Č. 5430 JUS. C.B9. 021	900-1100	min. 700	min. 12	min. 55	min. 41	217 - 241	
	Uzorak	1.	748	525	14	35	33	229
		2.	828	605	17	54	44	241
		3.	828	624	17,5	57	46	241
MEDU SLOJ - PUFER -	EPP3 - EP55	460 - 560	345 - 440	23 - 28	—	$A_v$ 49 - 95	—	
	Uzorak	1.	487	347	27	54	62	143
		2.	484	363	30	61	63	166
		3.	490	363	29	58	62	143
TVRDI SLOJ - HARD -	EPPCr6 - EP55	—	—	—	—	—	—	
	Uzorak	1.	1240	←	PRERAČUNATO			355
		2.	1290					369
		3.	1200					341



Sl.2. Dijagram naprezanja osnovnog materijala

Sl.3. Dijagram naprezanja među sloja

Sl.4. Dijagram raspodele tvrdoće

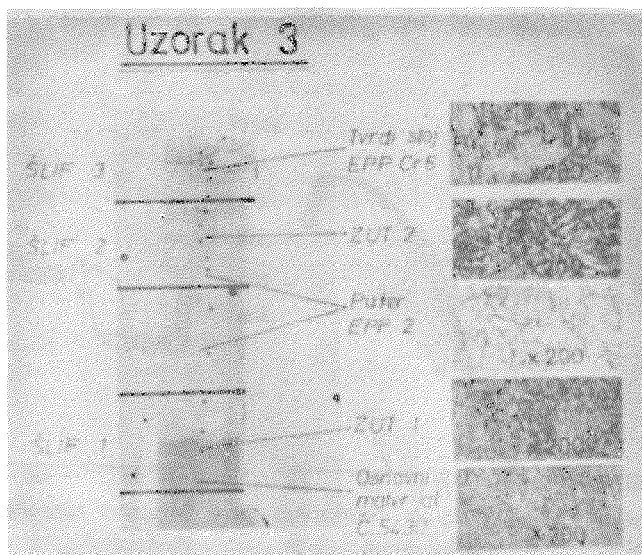
Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina materijala valjaka uglavnom odgovaraju onim datim standardima, katalogima proizvođača ili očekivanim vrednostima za pojedine vrste materijala.

#### 4. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA

Poprečni preseki sva tri uzorka valjaka nagrizani su sa 3 % rastvorom azotne kiseline u alkoholu, nakon čega su jasno uočene zone sa odgovarajućim strukturama. S obzirom da se kod sva tri ispitivana uzorka valjaka zone i strukture po njima bitno ne razlikuju, to su na sl.5 prikazani poprečni presek sa zonama i strukturama kod uzorka 3.

Mikrostruktura po pojedinim zonama je sledeća:

- tvrdi sloj: Krupnozrna međufazna struktura ( sorbit -trusit )  
HARD sa tragovima Vidmanštetenovog rasporeda,
- Z U T 2 : Krupnozrna međufazna struktura sa izraženim granicama zrna i tragovima Vidmanštetenovog rasporeda,
- među sloj : Sitnozrna feritno perlitna struktura,  
PUFER
- ZUT 1 : Homogena pretežno sorbitna struktura,
- O M : Grubozrna, pretežno perlitna struktura Vidmanštetenovog rasporeda.



Slika 5 Poprečni presek uzorka 3 sa snimcima mikrostrukture po pojedinim zonama

Kod sva tri uzorka valjaka, određena je mikročistoća osnovnog materijala primenom JK skale, metodom najlošijeg polja prema standardu UNI 3244-64 " Ispitivanje nemetalnih uključaka u čeliku" pri čemu je površina posmatranja bila  $6 \text{ cm}^2$ , a dobijeno je sledeće:

SADRŽAJ UKLJUČAKA JK<sup>3</sup>P'4'6

4 0 A

4 0 0 D

Tip uključaka je A-sulfidi i D -oksidi a njihov sadržaj po jedinici posmatranog polja je zadovoljavajući. Makro pregledom poprečnih preseka pomoću stereo mikroskopa sa uvećanjem 25 X, kod sva tri uzorka valjaka nisu uočene makro greške kao što su prsline, lunkeri, neuvarenost, a koje bi bile posledica primenjene tehnologije. Na osnovu izvršenih metalografskih ispitivanja poprečnih preseka valjaka može se reći da su uočene strukture kod sva tri uzorka u istim zonama približno iste, da su zadovoljavajuće s obzirom na korišćeni dodatni materijal za navarivanje, primenjenju tehnologiju navarivanja i načina korišćenja u proizvodnji.

## 5. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati metalurških ispitivanja materijala navarenih valjaka pokazuju da se nakon jednogodišnje primene u proizvodnji, u materijalu valjaka nisu dogodile značajnije promene koje bi uticale na njihovu funkcionalnost. Primenjena tehnologija reparaturnog navarivanja omogućila je uspešno održavanje metalurških valjaka. U zavisnosti od raspoloživog dodatnog materijala mogu se birati osobine naverenih slojeva.

## LITERATURA

1. "Zavarivost čelika" - Ivan Hrivnjak
2. "Metalurgija zavarivanja" - D. Sefarijan
3. "EPP zavarivanje" - Milan Živčić
4. "Toplinska obrada zavarenih spojeva" - Janko Jesterle
5. Katalog proizvođača dodatnog materijala za zavarivanje "Željezara Jesenice".
6. Razni standardi: za materijale, za zavarivanje, za metode ispitivanja, itd.

Todorovski Ivko, Marković Živorad

## ANALYSIS QUALITY OF THE REWELDING ROLLS FOR CONTINUOUS CASTING

## SUMMARY

The results of metallurgical analysis done on the rewelding rolls indicate that no change in the material composition of the rolls occurred during one year of normal use, which would affect function. This special technology for rewelding metallurgical rolls yielded the following improvements after 3 years use:

- Discontinued importation of rolls at MK- Smederevo,
- Rolls endurance is increased by 200 %, while the cost of this special technology is 60 % cheaper less expensive than the cost of a new rolls
- Maintenance costs are reduced.



Ž. Popović, M. Jovičić\*

UTICAJ TEHNOLOŠKOG ZAZORA I USLOVA OBRADJE PRI  
PROSECANJU NA HABANJE RADNIH ELEMENATA ALATA  
I VISINU IZDIGNUTE IVICE IZRADAKA OD Cu-Zn-Ni  
LEGURE

1. UVOD

Niska postojanost radnih elemenata alata za prosecanje i probijanje (prosekači, probojci, ploča za probijanje i prosecanje) otežava ostvarivanje istih karakteristika kvaliteta izradjenih delova, uslovljava češće zastoje u proizvodnji usled promene i oštrenja alata, izaziva sniženje proizvodnosti obrade i povećanje troškova proizvodnje.

U našim istraživanjima procesa obrade prosecanjem i probijanjem posebna pažnja je bila posvećivana ispitivanju uticaja uslova obrade na habanje, odnosno uticaja habanja radnih elemenata alata na tačnost i kvalitet obrade kao i na razvoj metoda za praćenje veličine habanja i utvrđivanje postojanosti alata. Pri tome je osnovni cilj tih istraživanja bio da se između načini za smanjenje habanja, tj. povećanje postojanosti alata, poboljšanje tačnosti i kvaliteta izradaka i sniženje troškova proizvodnje.

U ovom radu su prikazani neki rezultati istraživanja, a odnose se na uticaj tehnološkog zazora i drugih uslova obrade na habanje radnih elemenata alata i visinu izdignute ivice pri prosecanju izradaka od Cu-Zn-Ni legure.

2. MEHANIZAM HABANJA RADNIH ELEMENATA ALATA ZA PROSECANJE I  
OCENA HABANJA PREKO VISINE IZDIGNUTE IVICE IZRADAKA

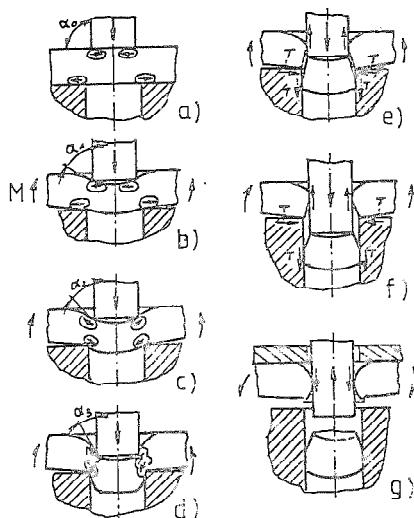
2.1. Mehanizam habanja i zone habanja radnih elemenata alata

Pri prosecanju prodiranjem presekača u lim vrši se odvajanje, tj. pomeranje lima po bočnim površinama radnih elemenata alata. Pri tome se vlakna lima istežu i sabijaju a materijal teče u široj okolini deformisanja.

---

\* Mr Željko Popović, dipl.maš.inž., predavač Više tehničke mašinske škole u Beogradu; dr Milenko Jovičić, dipl.maš.inž., redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu





Sl. 1. Faze prosecanja sa zonama kontakta i tečenja materijala lima po površinama radnih elemenata alata

Na slici 1 prikazane su zone kontakta i pravci tečenja materijala lima u toku pojedinih faza prosecanja.

U fazi I (elastično deformisanje) materijal lima teče po čeonim površinama presekača i ploče za prosecanje (slika 1, a i b), pri tome nastaje habanje po čeonim površinama radnih elemenata alata.

U fazi II koja traje od početka plastičnog deformisanja (sl. 1c) do okončanja formiranja glačanog pojasa na površinama razdvajanja izratka (otpatka) i trake (sl. 1d), zone kontakta lima sa čeonim površinama radnih elemenata alata se bitno smanjuju, materijal lima teče u suprotnom smeru i ima kontakt po sečivima

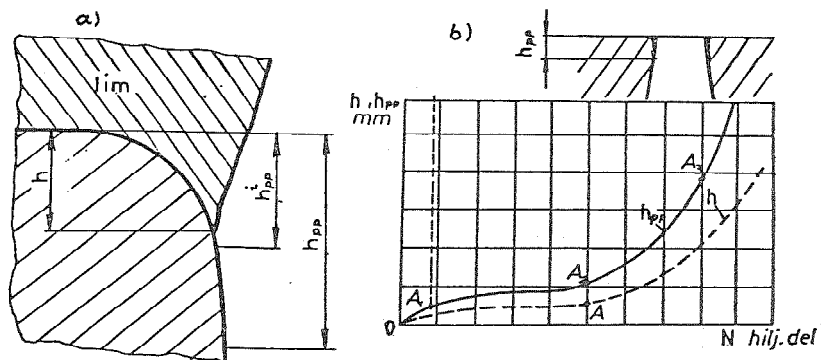
prosekača i ploče za prosecanje. Rezultat takvog karaktera tečenja materijala lima po čeonim površinama i oko sečiva radnih elemenata je čeono i ivično habanje (habanje u oblasti sečiva, t.j. njihovo zaobljavanje) presekača i ploče za prosecanje.

U fazi III, t.j. od trenutka završetka plastičnog deformisanja i odvajanja (sl. 1e) i proterivanja izratka (otpatka) kroz otvor ploče za prosecanje (sl. 1f) nastaje trenje između presekača i lima, odnosno ploče za prosecanje i izratka. Usled ovoga trenja javlja se habanje bočnih površina radnih elemenata alata. Pri povratnom hodu sledi promena smera sile trenja, što takodje izaziva dopunsko habanje bočnih površina presekača.

## 2.2. Ocena veličine habanja radnih elemenata alata preko visine izdignute ivice izratka

Merenje veličina koje karakterišu habanje radnih elemenata alata (širine pojasa habanja ili zapremine habanja) je otežano i zahteva demontažu alata, radi čega su u primeni najčešće metode posrednog praćenja habanja preko kvaliteta izradjenih delova i njihove dimenzione tačnosti. Naime, u procesu obrade usled habanja radnih elemenata alata dolazi do promene dimenzija i povećanja visine izdignute ivice na konturi izradaka. Pri tome je visina izdignute ivice

proporcionalna veličina habanja u oblasti sečiva radnih elemenata alata i ima istu zakonitost promene kao i habanje (sl. 2). To znači da se merenjem promene visine izdignute ivice na izratcima može odrediti trenutak početka intenzivnog habanja radnih elemenata alata, odnosno postojanost alata.



Sl. 2. Šema formiranja izdignute ivice (a) i zavisnost njene visine  $h$  i veličine bočnog habanja  $h_{pp}$  otvora ploče za prosecanje (b) od broja izradjenih delova.

Merenje visine izdignute ivice na izratcima može se izvoditi relativno na prost način, a za potrebe naših istraživanja razvijeni su i korišćeni posebni pribori [1]. Jedan od tih pribora, čija je šema prikazana na slici 3, omogućava merenje visine izdignute ivice  $h$  kao i veličine savijanja (ugiba) izratka  $f$ .

Postupak merenja visine izdignute ivice izratka sastoji se u sledećem: na pločici (5) nalazi se prsten (4) u koji se postavljaju i centriraju izratci (3). Pri merenju se najpre očita vrednost  $y_1$  na skali komparatora (1), a zatim se ispod umetka (2) umesto izratka postavi etalon (6) visine  $e_1$  i očita na komparatoru vrednost  $x_1$ . Iz izraza

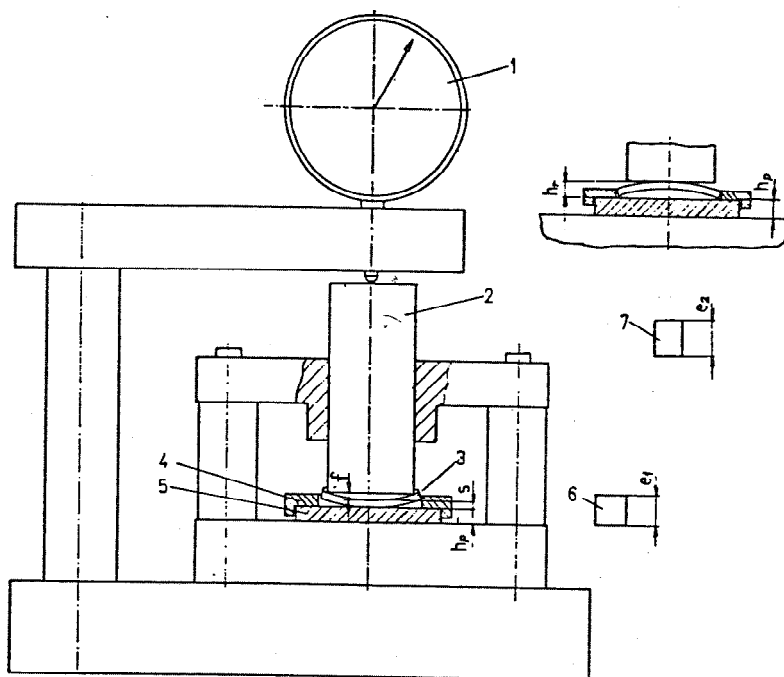
$$y_1 = h_p + s + f = e_1 + x_1$$

dobija se veličina savijanja izratka  $f = e_1 + x_1 - h_p - s$ . Zatim se izradak okrene, postavi na pločicu (5) i očita vrednost  $y_2$  na komparatoru a potom se umesto izratka postavi etalon (7) visine  $e_2$  i očita vrednost  $x_2$ . Iz jednakosti:

$$y_2 = h_p + h_r = e_2 + x_2 \quad \text{i} \quad h_r = s + f + h$$

dobija se visina izdignute ivice izratka  $h$

$$h = e_2 + x_2 - h_p - f$$



Sl. 3. Šema mehaničkog pribora za merenje veličine savijanja i visine izdignute ivice izradaka pri prosecanju

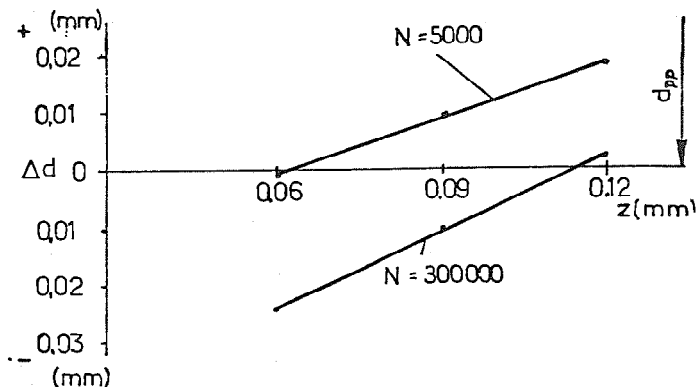
### 3. UTICAJ TEHNOLOŠKOG ZAZORA I NAČINA HLADJENJA NA VISINU IZDIGNUTE IVICE I HABANJE RADNIH ELEMENATA ALATA

#### 3.1. Uticaaj veličine tehnološkog zazora

Veličina tehnološkog zazora ima veliki uticaj na tačnost i kvalitet obrade kao i na habanje radnih elemenata i postojanost alata. Pri maloj veličini zazora intenzivnije je trenje a time i habanje radnih elemenata alata i obrnuto.

Na slici 4 prikazana je zavisnost razlike prečnika otvora u ploči za prosecanje i prečnika izratka  $\Delta d$  od veličine tehnološkog zazora posle 5000 i 300.000 izradjenih delova od Cu-Zn-Ni legure (debljina lima 1,5 mm, tvrdoća 180-210 HB, hladjenje tečnim SPH). Razlika prečnika  $\Delta d$  zavisi od veličine zazora i broja izradjenih delova. Tako pri zazoru od 0,06 mm (tj.  $z = 0,04$  s) razlika između prečnika izratka i otvora u ploči za prosecanje jednaka je nuli posle 5000 izradjenih delova, dok je prečnik izradaka veći za oko 0,02 mm od prečnika otvora u ploči za prosecanje posle 300.000 izradjenih delova (tj.

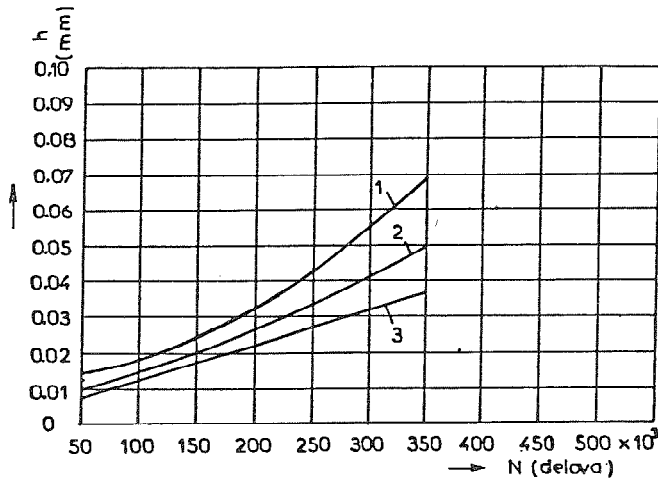
postoji "preklop"). Sa druge strane, pri zazoru od 0,12 mm ( $z = 0,08$  s) razlika prečnika otvora u ploči za prosecanje i prečnika izradaka je pozitivna ( $\Delta d \approx 0,02$  mm) posle izradjenih 5000 delova, a ovi prečnici su približno iste ve-



Sl. 4. Promena razlike prečnika otvora u ploči za prosecanje i prečnika izradaka u zavisnosti od veličine zazora i broja izradjenih delova

ličine posle 300.000 izradjenih delova. To znači da u ovom slučaju deo prolazi slobodno kroz otvor u ploči za prosecanje, što nije slučaj kod manjih veličina tehnološkog zazora između radnih elemenata alata. Svakako je i habanje ploče za prosecanje veće u slučaju manje veličine zazora, a veća je i sila potrebna za proterivanje delova kroz otvor u ploči za prosecanje (odnosno sila izbacivanja, ukoliko se delovi vraćaju naviše). Za dati materijal lima veličina zazora, koja obezbeđuje zahtevani kvalitet izradaka treba da se kreće u intervalu (0,4 - 0,08) s, s tim što se kod veće vrednosti zazora ostvaruje veća postojanost alata.

Na slici 5 prikazana je zavisnost visine izdignute ivice (koja je srazmerna habanju radnih elemenata alata) i broja izradjenih delova za tri vrednosti zazora:  $z = 0,06$  mm, odnosno 0,04 s (1),  $z = 0,09$  mm (2) i  $z = 0,12$  mm, tj. 0,08 s (3), za ostale uslove obrade kao za zavisnost datu na sl. 4 (tj. lim od Cu-Zn-Ni legure debljine 1,5 mm i tvrdoće 180-210 HB, radni elementi alata od alatnog čelika Č. 4150 tvrdoće 55 HRC). Vidi se da je najintenzivniji porast visine izdignute ivice (tj. najveće habanje radnih elemenata alata) bio pri najmanjem zazoru, odnosno najmanji pri najvećem zazoru. Ukoliko bi npr. visina izdignute ivice bila ograničena na vrednost 0,03 mm, proizilazi da bi postojanost alata pri najmanjem zazoru bila oko 180.000 izradjenih delova, odnosno pri najvećem zazoru oko 280.000 delova.



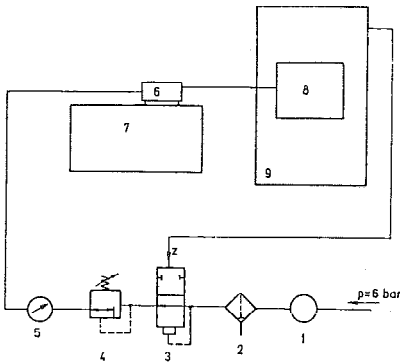
Sl. 5. Zavisnost visine izdignute ivice izradaka od legure Cu-Zn-Ni od veličine zazora i broja izradjenih delova za radne elemente od alatnog čelika i hladjenje sa tečnim SPH

### 3.2. Uticaaj načina podmazivanja i hladjenja

Pri prosecanju i probijanju podmazivanjem radnih elemenata alata i lima smanjuje se trenje u zonama kontakta lima i radnih elemenata alata a time i habanje i povećava postojanost alata. Pri tome se smanjuje i sila potrebna za proterivanje delova kroz otvor u ploči za prosecanje kao i opterećenje radnih elemenata alata. Efikasnim podmazivanjem i hladjenjem zona kontakta lima i radnih elemenata alata smanjuje se i pojava krzanja sečiva radnih elemenata alata, koja je često uzrok otkaza ovih alata (posebno u slučaju primene tvrdog metala). Primena sredstva za podmazivanje i hladjenje pospešuje i odvođenje čestica materijala lima iz radne zone alata.

U našim ispitivanjima primenjivana su dva načina nanošenja sredstava za podmazivanje i hladjenje (SPH) na površine lima i radne elemente alata: nanošenje tečnog SPH na površine lima (slike 4 i 5) i nanošenje tečnog SPH strujom vazduha u vidu magle (podmazivanje maglom SPH).

Smeša tečnog SPH i vazduha obrazuje se pomoću odgovarajućeg uređaja, koji se sastoji od sledećih elemenata (slika 6): vazduh pod pritiskom (od kompresora) dovodi se, preko slavine (1) i prečistača (2) ka ventilu (3) upravljanom od strane prese. Dalje se vazduh sprovodi kroz ventil za regulaciju pritiska (4) i manometar (5) ka razvodniku-mešaču (6), u kome se vrši mešanje vazduha i tečnog SPH iz rezervoara (7). Magla SPH se može nanositi na površine lima



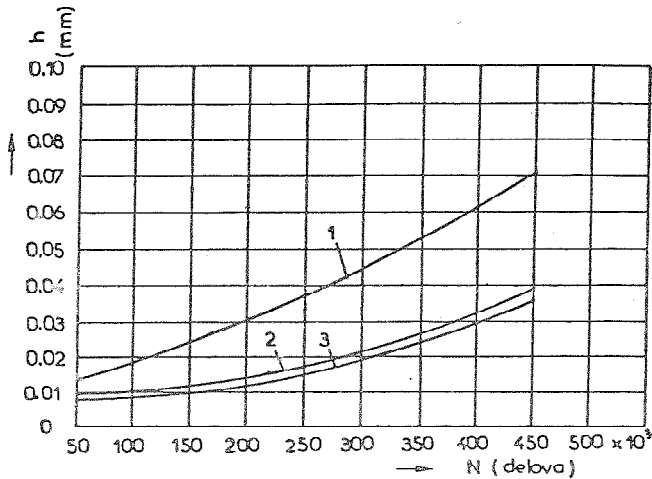
Sl. 6. Šema uredjaja (instalacije) za stvaranje magle SPH

ili u radnu zonu alata kroz odgovarajuće otvore u presekačima (8 - alat, 9 - presa).

Podmazivanjem i hladjenjem pomoću magle SPH ostvaruje se manja potrošnja SPH, efikasnije podmazivanje kontaktnih zona lima i radnih elemenata alata kao i bolje ispiranje radne zone alata, a time se smanjuje habanje a povećava postojanost alata.

Na sl. 7 prikazana je zavisnost visine izdignute ivice od veličine zazoru i broja izradjenih delova pri prosecanju lima od Cu-Zn-Ni legure pri podmazivanju radne zone alata pomoću magle SHP (pritisak  $0,1 \text{ daN/mm}^2$  i potrošnja smeše 3 litra/času) pri ostalim uslovima obrade kao za zavisnost datu na sl. 5. Vidi se da je intenzitet povećanja visine izdignute ivice pri najmanjem zazoru ( $z = 0,06 \text{ mm}$ , tj.  $0,04 \text{ s}$ ) približno isti kao na sl. 5, dok je za ostale dve vrednosti zazoru ( $z = 0,09$  i  $0,12 \text{ mm}$ ) povećanje visine izdignute ivice u ovom slučaju znatno sporije i u manjoj meri zavisi od veličine zazoru.

Postojanost alata za visinu izdignute ivice od oko  $0,03 \text{ mm}$  pri većoj ve-



Sl. 7. Zavisnost visine izdignute ivice izradaka od veličine zazoru i broja izradjenih delova prosecanja lima od Cu-Zn-Ni legure pri podmazivanju maglom SPH

ličini zazora odgovara oko 400.000 izradjenih delova, u odnosu na oko 280.000 izradjenih delova pri primeni tečnog SPH (sl. 5). Pri većoj količini SPH ostvareno je još veće povećanje postojanosti alata.

#### 4. ZAKLJUČAK

Habanje radnih elemenata alata za prosecanje i probijanje može se dosta tačno oceniti merenjem visine izdignute ivice na izradjenim delovima (ili otpacima).

Pri prosecanju delova od Cu-Zn-Ni legure promenom veličine tehnološkog zazora u intervalu koji obezbedjuje dobar kvalitet izradjenih delova može se značajno smanjiti intenzitet habanja radnih elemenata i povećanje postojanosti alata. Takođe primenom podmazivanja radnih elemenata alata maglom SPH ostvaruje se značajno smanjenje habanja i povećanja postojanosti alata.

#### Reference:

- /1/ Popović, Ž. Prilog istraživanju mogućnosti za povećanje postojanosti alata i tačnosti obrade pri prosecanju i probijanju, magistarski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd, 1988
- /2/ Mihalenko, F.P., Stojkost razdeliteljnih štopov, Mašinstroenie, Moskva, 1976
- /3/ Popović, Ž. Jovičić, M. Odredjivanje eksploatacijskih karakteristika alata za prosecanje i probijanje sa radnim elementima od tvrdog metala pri izradi delova od dinamolima, XIX Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985

Ž. Popović, M. Jovičić

EINFLUSS DES SCHNEIDSPALTS UND DIE SCHNEIDBEDINGUNGEN  
BEIM SCHRESCHNEIDEN AUF DEN WERKZEUGVERSCHLEISS UND  
DIE SCHNITTGRATHÖHE VON WERKSTRÜCKEN AUS Cu-Zn-Ni DIE  
LEGIERUNG

#### Summary

In der Arbeit werden die Ergebnisse der Untersuchung über den Einfluss des Schneidspalts und die Schmierungsart auf die Schnittgrathöhe beim Scherschneiden von Werkstücke aus Cu-Zn-Ni Legierung. Dabei kann man nehmen des die Schnittgrathöhe des Werkzeugverschleiss proportionel ist.

Tomislav Todić

ЦЕНА ПОСТОЈАНСТИ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА АЛАТА  
ЗА ПРОСЕКАЊЕ И ПРОБИЈАЊЕ

1. UVOD

Алати за обраду деформационим раздвајањем/просекање и пробијање/ су најраспрострањени у производној пракси а њихова ефикасност је изражена кроз квалитет израдка, продуктивност и трајност алата.

Под квалитетом израдка овде се првенствено мисли пре свега на квалитет просећене површине, затим закривљеност израдка, појави игличастог венца, одступање од задатих димензија итд.

Захтев за повећани квалитет израдка све је више актуелан у савременој индустриској производњи из разлога повећања квалитета финалног производа.

Разумљива су стoga и све чеšћа испитивања фактора који утичу на квалитет израдка а са циљем проналажења начина и средстава како негативне утицаје спречити или ублажити.

Проблем квалитета и облика просећене површине све је више актуелан у савременој индустриској производњи а који се своди на добијање квалитетног комада без додатних операција просекања или обраде скидањем струготина. Застоји проузроковани неквалитетним отпресцима а посебно због појаве игличастог венца а самим тим и одступање тачности комада су посебан проблем.

Уз све ово не сме се испустити из вида захтев по питању века трајања алата којџ би требало да буде максималан.

---

\* / Dr Tomislav Todić, dipl.ing., docent  
Mašinskog fakulteta u Prištini, ul. Sunčani breg bb.



Pojava zatupljenosti reznih ivica alata odražava se na kvalitet izradka a posebno na visinu igličastog venca. Sobzirom na to u najčešćem slučaju kao kriterijum za zatupljenije reznih elemenata alata uzima se veličina igličastog venca na osnovu koje se donosi odluka o prestanku proizvodnog procesa i pristupa oštrenju reznih elemenata alata. Iz napred navedenog razloga autor ovog rada prati pojavu promene visine igličastog venca i na osnovi toga donosi ocenu o istrošenosti reznih elemenata alata.

Direktno merenje pohabanosti presekača i ploče za prosecanje radi dobijanja karakteristike habanja u funkciji broja izradjenih komada/N/ otvara novi niz problema počev od prekida proizvodnog procesa pa do promene uslova rada alata zbog montaže i demontaže.

Merenje visine igličastog venca vršeno je na alatom mikroskopu tip-a 30-G684a Carl Zeiss sa pokretnom optičkom merenom skalom stepena tačnosti  $\pm 0,01\text{mm}$  i uvećanjem od 24 puta.

Sve faktore koji utiču na izgled i kvalitet prosečene površine kao i na vek trajanja reznih ivica alata mogu se grupisati na uticajne faktore/1,2/:

- mašine
- alata
- tehnoloških parametara obrade

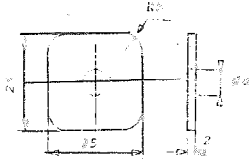
## 2. SELEKCIJA UTICAJNIH FAKTORA

U cilju ispitivanja procesa razdvajanja materijala postupkom prosecanja i probijanja a u cilju dobijanja kvalitetne prosečene površine i povećanja trajnosti reznih elemenata alata, potrebno je uzeti u obzir najznačajnije uticajne faktore za koje se raspolaže saznanje da bitno utiču na proces razdvajanja materijala. Sozirom na veliki broj uticajnih faktora iz gore pomenutih grupa selekcija faktora je opravdana i nužna zbog otežane kontrole i lakšeg upravljanja procesom.

Selekcija uticajnih faktora izvršena je na osnovu svestrane analize faktora i metodom slučajnog balansa/3,4/. Ostali uticajni faktori uzeti su kao granični uslovi.

U cilju realizovanja planiranog eksperimenta za potrebe selekcije faktora i izrade matematičkog modela promene visine

igličastog venca usvojen je obradak koji se masovno izradjuje u fabrici komandnih postrojenja "Energoinvest-a" u Prištini. Materijal dela je Čol46 debljine 2mm.



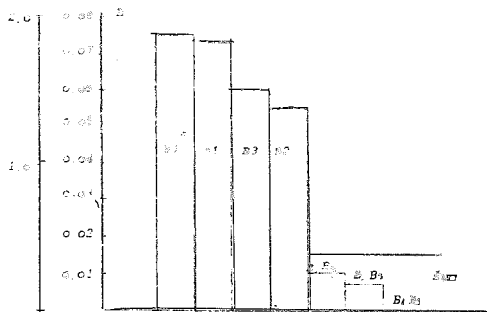
Sl.1 Izradak

Na osnovu sprovedene procedure plana slučajnog balasa i fermirane plan matrice uz pomoć višefaktornih planova prvog reda /polureplika od potpunog plana/, uz drastično smanjenje troškov odnosno broja eksperimenata izdvojeni su najuticajniji faktori

- veličina zazora izmedju reznih elemenata/W/
- brzina deformacionog razdvajanja materijala/V/
- tvrdoća reznih elemenata/T/

Ostali uticajni faktori uzeti su kao granični uslovi ili odbačeni kao polje šuma.

Veličine efekata izdvojenih faktora prikazane su na sl.2.



Sl.2 Dijagram efekata/selekcije i rangiranja/ faktora

### 3. MATEMATIČKI MODEL PROCESA POVEĆANJA VISINE IGLIČASTOG VENCA

Tačnost opisivanja procesa zavisi od izabranog odnosa re-  
da modela. Kao analitički model napred navedenih faktora i

visine igličastog venca predpostavlja se stepena funkcija oblika

$$H = C W^a V^b T^c \quad (1)$$

gde je:

H- visina igličastog venca

a, b, c - eksponenti

C- konstanta

U ovakvu predpostavljenu zavisnost potrebno je odrediti konstantu (C) i eksponente (a), (b), (c). Ovakav oblik zavisnosti ne daje jednostavnu mogućnost odredjivanja konstante (C) kao ni eksponenta (a), (b) i (c). U tu svrhu gornji oblik zavisnosti prevodi se u linearni

$$\ln H = \ln C + a \ln W + b \ln V + c \ln T \quad (2)$$

gde su:

$$Y = \ln H, \quad b_0 = \ln C, \quad b_1 = a, \quad b_2 = b, \quad b_3 = c, \quad x_1 = \ln W, \quad x_2 = \ln V, \quad x_3 = \ln T \quad (3)$$

a uzimajući u obzir i grešku eksperimenta ( ) jednačina dobija oblik

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \quad (4)$$

Sobzirom na usvojene uticajne faktore potrebno je formirati novu plan matricu ali tako da ispunjava uslove simetričnosti, ortogonalnosti i normativnosti gde skup graničnih tačaka intervala varijacije ulaznih faktora leži uvek na hipersferi. Takva plan matrica predstavljena je u obliku tabele.

Redni broj eksperimenta	Ulazni faktori procesa					N	lnH	P	L <sub>ij</sub>
	Nivo varijacija param	W	V	T	Izlazni rezultati				
		/mm/	/u/s/	HRG					
	Gornji	+1	0,4	0,2					
	Srednji	0	0,18	2,1	58				
	Donji	-	0,06	0,5	20				
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	N	lnH	P	L <sub>ij</sub>	
1	+1	-1	-1	-1	0,20	-1,3853	1,3	0,0001	
2	+1	+1	-1	-1	0,175	-1,7428	0,55	-0,5097	
3	+1	-1	+1	-1	0,30	-1,2039	1,05	0,0060	
4	+1	+1	+1	-1	0,22	-1,9101	0,5	-0,0011	
5	+1	-1	-1	+1	0,17	-1,7719	1,2	0,1800	
6	+1	+1	-1	+1	0,12	-2,1202	0,4	-0,9160	
7	+1	-1	+1	+1	0,25	-1,5883	1,05	0,0000	
8	+1	+1	+1	+1	0,16	-1,9018	0,5	-0,0031	
9	+1	0	0	0	0,18	-1,7147	0,6	-0,5100	
10	+1	0	0	0	0,18	-1,6607	0,6	-0,5108	
11	+1	0	0	0	0,108	-1,8871	0,0	0,0000	

Sastavljena plan matrica predstavlja potpuni ortogonalni plan prvog reda sa brojem eksperimentalnih tačaka  $N=2^k$  i ponavljanjem u centralnoj tački plana  $/n_0=3/$ .

Kodiranje pojedinih faktora izvodi se preko jednačina

$$\begin{aligned}x_1 &= 2 \frac{\ln W - \ln W_{\max}}{\ln W_{\max} - \ln W_{\min}} + 1 \\x_2 &= 2 \frac{\ln V - \ln V_{\max}}{\ln V_{\max} - \ln V_{\min}} + 1 \\x_3 &= 2 \frac{\ln T - \ln T_{\max}}{\ln T_{\max} - \ln T_{\min}} + 1\end{aligned}\quad (5)$$

Uspostavljanje funkcionalne veze (1) vrši se na osnovu dobijenih rezultata merenja izlaznih veličina, određivanjem koeficijenata  $b_0, b_1, b_2, b_3$  u jednačini (4).

Veličine ovih koeficijenata određuju se korišćenjem metoda najmanjih kvadrata i svojstva skalarnog proizvoda osnovnih vektora ili korišćenjem osobina plan matrice/simetričnosti, ortogonalnost i normativnost/

Korelaciona matrica

$$X^{\circ}X = \begin{vmatrix} 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{vmatrix} \quad (X^{\circ}X)^{-1} = \begin{vmatrix} 1/11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{vmatrix}$$

$$X^{\circ}Y = \begin{vmatrix} -17,9902 \\ -1,4306 \\ 1,1152 \\ -1,2330 \end{vmatrix}$$

Iz jednačine  $B = (X^{\circ}X)^{-1} \cdot X^{\circ}Y$  slede parametri modela

$$\begin{aligned}b_0 &= -1,6355 \\b_1 &= -0,1788 \\b_2 &= 0,1394 \\b_3 &= -0,1541\end{aligned}$$

Traženi empirijski model glasi

$$Y = -1,6355 - 0,1788x_1 + 0,1394x_2 - 0,1541x_3$$

Vraćajući se na prirodne koordinate a preko jednačina(3) i jednačine transformacije(5) koje sada glase

$$x_1 = 1,243 \ln V + 2,496 \quad x_2 = 0,983 \ln V + 6,54$$

$$x_3 = 14,4 \ln T - 58,4$$

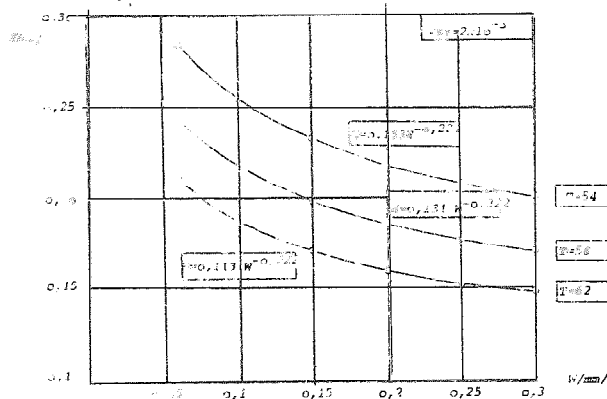
sledi matematički model

$$H = 2512 \frac{V^{0,137}}{W^{0,222} T^{2,219}} \quad (6)$$

za koga su izvršene odgovarajuće provere u smislu adekvatnosti modela za određeni interval varijacije kao i granice pouzdanosti modela.

Upoređivanjem uticaja pojedinih faktora na habanje alata a na osnovu funkcionalne zavisnosti(6) može se uočiti sledeće:

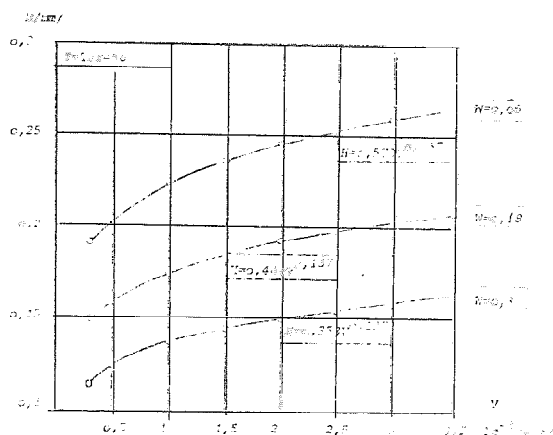
- Najveći uticaj na promenu visine igličastog venca posle (N) uradjenih komada ima zazor izmedju reznih elemenata(W) (sl.3) sa koje se jasno vidi da je najveća trajnost alata pri zazoru 0,3mm i tvrdoći 62HRC



Sl.3 Promena visine igličastog venca u funkciji promene zazora i različitim tvrdoćama

Promena visine igličastog venca odnosno ocena izdržljivosti reznih ivica u funkciji promene brzine deformisanja pri različitim vrednostima zazora izmedju reznih elemenata(u okviru

uzetog intervala varijacije) pokazuje da rad sa velikim brzinama deformisanja smanjuju vek trajanja alata. Ovo je naročito izraženo kod primene smanjenih zazora između reznih elemenata alata (sl.4).



Sl.4 Promena visine igličastog venca u funkciji promene brzine prosecanja i probijanja i pri različitim vrednostima zazora

Analizom dijagrama sl.4 koji je dobijen na bazi matematičkog modela proizilazi sledeće

1. Najveću izdržljivost/ $H_{min}$ / pokazuju alati sa malom brzinom deformisanja/ $0,466 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , tvrdoćom 58HRC i zazorom  $0,3 \text{ mm}$ . No s obzirom da pri zazoru od  $0,3 \text{ mm}$  razd površ. je kosa u odnosu na ravan lima što često puta ne zadovoljava traženi kvalitet to je optimalnije rešenje upotreba male brzine deformisanja kao u predhodnom slučaju, ve like tvrdoće reznih elemenata i srednje veličine zazora.
2. Najmanju izdržljivost/prema matematičkom modelu/ pokazuju alati sa smanjenim zazorom i smanjenom tvrdoćom reznih elemenata. Ovo je i sasvim logično i očekivati. Stoga ove veličine uticajnih faktora treba izbegavati ako već nismo unapred predodredjeni na njih.
3. Najkvalitetnije prosečene površine mogu se dobiti pri malim zazorima između reznih elemenata. Medjutim ova- kvi zazoru nesumljivo pokazuju najmanju izdržljivost alata.

Prema dobijenom matematičkom modelu uz korišćenje malih zazora najoptimalnije rešenje je upotreba malih brzina defor-

misanja i velike tvrdoće reznih elemenata. Ovo iz razloga smanjenja temperature reznih ivica a samim tim manje promena u mikrostrukturi na površini reznih ivica odnosno manje habanje.

#### 4. ZAKLJUČAK

Præćenje razvoja habanja reznih elemenata alata indirektnom metodom odnosno praćenjem razvoja promene visine igličastog ve nea je jednostavan naćin ali ne daje velićine habanja reznih elemenata već samo ocenu njihove pohabanosti.

Kvalitet izradka, izgled prosećene površine sa vekom trajanja reznih ivica alata su u tesnoj medjusobnoj vezi.

U cilju iznalaženja optimalnog veka trajanja alata i postizanja kvalitetnog izradka treba naći odredjeni kompromis izmedju postizanja odgovarajućih karakteristika habanja i kvaliteta prosećene površine uzimajući pri tome složenju funkciju cilja.

#### LITERATURA

- /1/ N.K Fotev                   Visokostoikie štampi. Mašinstroenie  
Moskva, 1965
- /2/ Popović P.                 Prilog razmatranju problema veka alata  
Janković Lj.                 za prosecanje i probijanje", Obrada def.  
u mašinstvu, br.2, Novi Sad 1976
- /3/ Stanić J.                 Matematićke osnove tehnookonomske optimi-  
zациje obradnih procesa, Mašinski fakultet  
Beograd 1976.
- /4/ Stanić J.                 Metod inženjeriskih merenja, Mašinski fa-  
kultet Beograd 1981.

Tomislav Todić

#### ESTIMATION OF PERSISTANCE OF TOOL'S CUTTING ELEMENTS FOR CUTTING AND PENETRATION

The presentation of obtaining the mathematical model that describes the variation of tool's curved peak height on the basis of the experimental investigation performed by the author is given in this work. On the basis of the obtained mathematical model the estimation of wearing resistance of the edges of cuttrug and penetration tools during the tool exploitation is given.

By the analysis of the mathematical model, the optimum values of input parameters for maximum tool resistivity may be gained.

D. Nikolić<sup>x</sup>

OSNOVNI PROBLEMI UPRAVLJANJA OBRADNIM  
SISTEMIMA ZAPREMINSKOG OBLIKOVANJA  
PLASTIČNIM DEFORMISANJEM<sup>xx</sup>

1. UVOD

Potreba za zadovoljanjem sve oštrijih zahteva u mašinogradnji i metaloprerađivačkoj industriji u smislu: povećanja proizvodnosti, kvaliteta proizvoda i ekonomske efikasnosti pa i osvajanja novih proizvoda, u čemu vrlo istaknuto mesto pripada tehnologijama zapreminskog oblikovanja plastičnim deformisanjem, određuje osnovne pravce njenog razvoja:

- tehnologija oblikovanja,
- visokokvalitetne i visokoproduktivne osnovne opreme,
- sistema upravljanja i automatizacije,
- automatskog projektovanja tehnoloških procesa.

Sva četiri navedena područja razvoja su međusobno kompleksno zavisna, međutim, prvo čini osnovu svih ostalih. Zato se, pa i zbog njegovog uticaja na sistem upravljanja, njemu posvećuje nešto veća pažnja, svakako, u skladu sa relativno malim prostorom. Takođe, kao što i sam naslov kaže, ali u nešto širem obimu, biće reči i o upravljanju obradnih sistema.

---

<sup>x</sup> Prof. Dr Dragomir Nikolić, Mašinski fakultet, Beograd, 27. Marta br. 80

<sup>xx</sup> Radjeno u okviru projekta "Razvoj specijalnih tehnologija oblikovanja metala u tečnom i plastičnom stanju" finansira Republička zajednica nauka Srbije



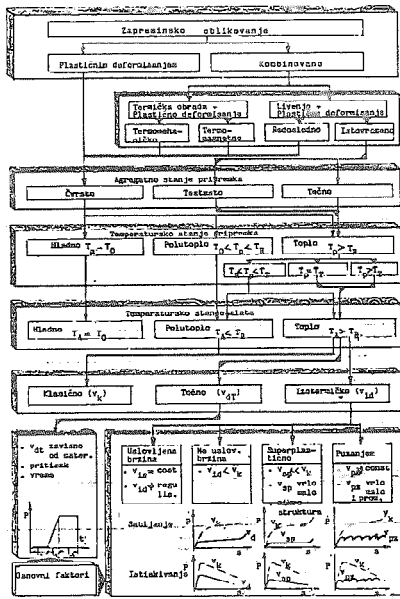
2. METODE ZAPREMINSKOG OBLIKOVANJA

Razvojem tehnologija oblikovanja plastičnim deformisanjem se istovremeno rešava čitav kompleks važnih problema. Osnovni pravci mogu se svrstati u tri kategorije

- i) usavršavanje postojećih u smislu povećanja njene efikasnosti i ekonomičnosti,
- ii) iznalaženje novih i širenje korišćenja progresivnih procesa sa malim ili bez otpadaka,
- iii) iznalaženje novih i širenja metoda koje obezbeđuju proizvodnju proizvoda viših klasa kvaliteta (tečnosti itd.).

Mnoštvo metoda do danas razvijenih i korišćenih pa i tendencije njihovog razvoja uslovlila je i raznolikost njihovih podela. Sve podele su uslovne. Jedna od mogućih, zasnovana na: osnovnim procesima, agregatnom i temperaturnom stanju priprema, temperaturnom stanju alata i nekoliko osnovnih tehnoloških parametara, je data na sl.1.1./1/Svaka od prikazanih metoda može se

dalje delimiti i prema osnovnim karakteristikama alata i dr. Metode date na slici 1. pripadaju tzv.grupi preovlađavajućeg prostog (jednivrsnog) napreznja (naprezanje na: sabijanje; istezanje; smicanje itd.) neophodno je istaći da dalje usavršavanje ovih metoda, često se nazivaju i tradicionalne, su veoma ograničene u smislu povećanja masa otkovaka, šira primena oblikovanja u zatvorenim alatima, oblikovanja u polutoplom stanju itd., prvenstveno zbog visokih specifičnih deformacionih otpora koji uslovljavaju: značajno smanjenje postojanosti alata



Slika 1.1.1.1. Skupština prikaza savremenih metoda zapreminskog oblikovanja. P - pritisak; a - put; t - vreme; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja pri klasičnom oblikovanju; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja u uslovnim superplastičnim; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja u uslovnim nasumičnim; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja u uslovnim isotermičnim uslovnim; v<sub>d</sub> - brzina deformisanja u oblikovanju u tečnom stanju; T<sub>0</sub> - temperatura oblika; T<sub>1</sub> - temperatura oroniranja; T<sub>2</sub> - temperatura topljenja; T<sub>3</sub> - temperatura kristalizacije materijala priprema; T<sub>4</sub> - temperatura alata.

(brzo trošenje alata) i korišćenje mašina većih nominalnih sila (ili uopšta tehničko-tehnoloških karakteristika).

Poslednjih godina sve veća pažnja se posvećuje razvoju metoda oblikovanja sa raznorodnim (složenim) naprezanjima (sabijanja sa smicanjem, sabijanja sa uvijanjem, valjanje sa vučenjem) i oblikovanjima sa tz. aktivnim silama trenja. Ova grupa metoda znatno smanjuje deformacioni otpor i pritisak na alat (čak nekoliko puta). Suština je u promeni uslova trenja na dodirnim površinama alata i obratka, najčešće smanjenjem koeficijenta trenja, odnosno efikasno upravljanje silama trenja.

Pored raznovrsnosti metoda treba istaći - raznovrsnost tehničko-tehnoloških karakteristika osnovne opreme (čekića i presa i najčešće na prilagodjene određene tehnologije), zatim, raznovrsnost procesa - plastičnog deformisanja, promena makro i mikrostrukture materijala, promena mehaničkih i fizičko-hemijskih karakteristika materijala, trenje, termičkih procesa i dr., zatim, raznovrsnost materijala, proizvodnih i niza drugih uslova ukazuje na složenost problema koje treba razrešiti da bi se ostvarila kvalitetno upravljanje obradnim sistemom.

### 3. OSNOVE UPRAVLJANJA OBRADNIM SISTEMOM

Suštinski novi kompleks problema, koji treba rešiti i koristiti pri definisanju i realizaciji tehnoloških parametara zapreminskog oblikovanja plastičnim deformisanjem, su oni od kojih zavisi: mogućnost prognožiranja kvaliteta izradaka i upravljanje procesom oblikovanja. Rešenje ovog kompleksa problema ne može se zasnivati samo na proračunima naponskog i deformabilnog stanja i sl., već je neophodno upotpuniti ga matematičkim modelom fizičkih procesa promene stanja metala, pri čemu određeno i vrlo značajno, čak i odlučujuće, mesto ima razaranje metala. Sa fizičke tačke gledišta plastična deformacija i razaranje imaju istu dislokacionu prirodu. Naime, dokazana je teorijski i eksperimentalno, da klizanje dislokacija u metalu, a time i plastična deformacija mogu nastati pod dejstvom polja sila, nezavisno od temperaturnog stanja. Srazmerno ojačanju (deformacionom) metala, pod određenim uslovima, relaksacija lokalnih napona, nastalih pri plastičnom deformisanju, postaje manje energetski pogodno od mehaničkog razaranja. Kao karakteristični parametri i kriterijumi ocene vrste i veličina razaranja koriste se: veličina ostvarene plastične deformacije do razaranja; strukturni položaj površine razaranja; lokalizacija razaranja; orijentacija mikropovršina razaranja; veličina plastične deformacije do početka lokalizacije; energija aktivacije procesa (karakteriše brzinu razaranja).

Proces razaranja se, obično, uslovno deli na pet etapa: inkubacioni period; začetak mikroprskotina; rast mikroprskotina do kritičkih veličina; stabilan rast prskotina i intenzivan (nestabilan) rast prskotina. U tehnološkom smislu najznačajnije su prve tri etape. U prvoj etapi se pojavljuju submikroskopske prskotine - pri čemu je najveća gustina u površinskom sloju. U drugoj etapi se obrazuju dislokacione prskotine i pukotine koje nisu povratne po eliminisanju napona ali ne utiču na veličinu specifične energije deformacije, termički su nestabilne i mogu biti eliminisane. U trećoj etapi razaranja naglo nastaje sniženje energije deformacije i to srazmerno daljem porastu deformacija.

Tehnološka mogućnost procesa oblikovanja plastičnim deformisanjem zavise od parametara deformabilnog tela a okarakterisana je tehnološkom deformabilnošću, koja se, u specijalnom slučaju - kovanja, naziva kovnost. Pod pojmom kovnost se podrazumeva kompleks mehaničkih i fizičko-hemijskih karakteristika obratka (priprema) koji ograničavaju veličinu promene oblika u određenom - celom ili u delu tehnološkog procesa. Kovnost priprema je okarakterisana deformabilnošću (D) i deformacioni otporom (F) a može se simbolično iskazati u obliku  $\xi(D)$  i  $\xi(F)$ , pri čemu je:  $\xi(D)$  relativna deformacija - ograničena početkom razaranja i  $\xi(F)$  relativna deformacija - ograničena ekonomski opravdanom postojanošću alata. Osnovne pojave značajne za određivanje  $\xi(D)$  su: stabilnost deformisanja; obrazovanja, razvoj i usporavanje razvoja prskotina; akumulacija oštećenja i verovatnoća razaranja, takodje, posebno su značajne, reološke karakteristike materijala obratka: elastičnost, plastičnost, viskozitet (žilavost). Svakako od posebnog značaja je plastičnost. Pod tim pojmom se podrazumeva veličina ukupne deformacije u određenoj tački obratka nastale do trenutka nastanka mikroprskotine, određenog intenziteta smičućih napona i drugih njihovih odnosa. Ukoliko je naponsko - deformabilno stanje nehomogeno spoljašnja opterećenja se smatraju da su lokalizovana - pa se, u ovom slučaju, mora posvetiti posebna pažnja onim tačkama u kojima u određenom trenutku nastoje skup ekstremnih veličina invarijantnih karakteristika tenzora - napona, deformacija, brzina deformacija, devijatora - napona, deformacija, brzina deformacija i devijatora brzine promene napona.

Određivanje broja operacija oblikovanja plastičnim deformisanjem se, u suštini, zasniva na zadovoljenju uslova:

$$\xi(D) - R(D) \geq \xi_{\max} \leq \xi(F) - R(F), \quad (1)$$

pri čemu je:  $\xi_{\max}$  - maksimalno dozvoljena relativna deformacija, u realnim proizvodnim uslovima, obratka,  $R(D)$  i  $R(F)$  - su rezerve deformabilnosti ne-

ophodnih za stabilan tehnološki proces koje obezbeđuju stabilne pokazatelje kvaliteta izratka i postojanosti alata.  $\epsilon_{\max}$  se određuje na osnovu oblika, odnosna dimenzija priprema i izradka u različitim pravcima, uzajamnih dejstava delova tela (veličina i rasporeda dopunskih i zaostalih napona) u konkretnim i tehničko-eksploatacionih uslova izratka:

- a) do početka obrazovanja nepovratnih sub i mikroskopskih defekata, koji pri nastavku deformisanja ili pak termičkoj obradi dovode do razaranja a time i smanjenju čvrstoće dela,
- b) do početka obrazovanja mikroprskotina,
- c) do početka obrazovanja mikroprskotina čiji broj i dimenzije prelaze dopuštene vrednosti.

Osnovni uticajni faktori na  $\epsilon(D)$  su: plastičnost materijala obratka, kvalitet priprema, geometrija obratka i uzajamni uticaji delova obratka i alata. Za praktičnu primenu ili inženjeriske proračune veličine  $\epsilon(D)$  i  $\epsilon(F)$  se daju u dijagramima plastičnosti

$$\bar{\epsilon}_p = \bar{\epsilon}_p (\bar{\sigma}_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, T) \quad (2)$$

i dijagramima deformacionog otpora

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma} (\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, T), \quad (3)$$

gde je:  $\bar{\sigma}_{ij}$  - tenzor napona,  $\epsilon_{ij}$  - tenzor deformacija,  $\dot{\epsilon}_{ij}$  - tenzor brzina deformacija,  $T$  - temperatura. Uspešnost upravljanja kvalitetom izradaka zavisi od tačnosti određivanja i kontrole ostvarivanja veličina  $\bar{\sigma}(D)$ ,  $\bar{\epsilon}(F)$ ,  $R(D)$  i  $R(F)$ .

Rešavanje problema optimalnog upravljanja obradnim sistemom se zasniva na savremenoj teoriji upravljanja i optimizacije. Obradni sistem kao objekt upravljanja je okarakterisan velikim brojem različitih parametara: parametri stanja, parametri upravljanja, parametri merenja i parametri poremećaja. Svi su, po pravilu, promenljivi sa vremenom. Operacionalizacija ovih parametara (sve četiri grupe) se vrši po određenom redosledu. Pre svega određuje se ciljna funkcija, koja nažalost, za slučaj oblikovanja plastičnim deformisanjem, se vrlo retko može predstaviti u obliku funkcije (obično su to matrice, tablice, grafici i sl.). Zadatak optimizacije je naći parametre upravljanja koji odgovaraju ekstremima ciljne funkcije. Iz niza razloga neposrednim rešenjem, obično iterativnim metodama, se dobijaju parametri upravljanja koji najčešće nisu ostvarljivi sistemom. S toga se dalja etapa zasniva na određivanju parametara upravljanja koji se najmanje razlikuju od idealnih (rešenja iz prve etape) što je vrlo često moguće samo ako se koristi princip njihovog rangiranja po važno-

sti - na osnovu ekspertnih ocena.

Najveće poteškoće u rešavanju problema optimizacije su u utvrđivanju kriterijuma optimizacije i definisanju modela. Što je zadatak specijalista najviših kvalifikacija. U tehničkoj kibernetici je dokazano da samo u 1 - 2% slučajeva vezu između parametara je moguće uspostaviti čisto matematičkim modelima i to samo za determinisane procese i regularne funkcije. Matematičko modeliranje, po pravilu, se zasniva na prikupljanju i obradi informacija metoda matematičkog planiranja eksperimenta. Uspešno rešenje se ostvaruje uvođenjem procesa u stacionarnu oblast i određivanja veličina matematičkog očekivanja, disperzije, korelacionih funkcija i dr.

U optimizaciji se koriste 30-ak metoda koje su praktično zasnovane na podeli na etape koje se uzastopno uz korišćenje metoda diskretnog dinamičkog programiranja dobija odgovarajuće rešenje. Međutim, mora se istaći da je teorija upravljanja tehnološkim procesom zapreminskog oblikovanja slabo razvijena. Zato se, obično, ograničava samo na razmatranje parametara stanja, upravljanja i poremećaja i to prve kategorije važnosti na osnovu kojih je moguće izvršiti uslovnu optimizaciju. Ovakav način rešavanja uslovljava niz značajnih i brojnih specifičnosti - osnovne su:

i) Mašine su najčešće sa vrlo širokim opsegom promena tehnoloških parametara pa zato, obično, ne odgovaraju optimalnim parametrima specijalnih tehnologija.

ii) Nedostatak matematičkih modela mašina i nerazvijenost metodike optimizacije njenih parametara.

iii) Složenost procesa oblikovanja.

iv) Realizacija principa povratne sprege se u suštini svodi na uporedjenju potrebne promene regulišuće promenljive, određene upravljačkim dejstvom, sa stvarnim njenim promenama. Utvrđeno odstupanje se koristi za ostvarenje regulišućeg dejstva na mašinu.

Složenost problema uslovljava: nestacionarnost osnovnih tehnoloških parametara; postojanje faktora koji se ne mogu kontrolisati (homogenost deformacije, brzina deformacije i dr.); složena zavisnost između ulaznih i izlaznih parametara procesa; inertnost ili značajno zakašnjenje signala u osnovnim kanalima upravljanja i dr.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog moguće izvesti osnovni zaključci:

i) Obradni sistem zapreminskog oblikovanja plastičnim deformisanjem je vrlo složen objekt upravljanja.

ii) Do danas nisu ekzatno utvrđeni kriterijumi, metode, postupci i sl., pa i teorija upravljanja tehnološkim procesom zapreminskog oblikovanja.

iii) Dosadašnja saznanja ukazuju da je najpogodniji pravac razvoja - u definisanju i razradi kompleksnih zatvorenih fleksibilnih sistema upravljanja.

#### Reference

- /1/ Nikolić D., Razvoj i usavršavanje tehnologija oblikovanja plastičnim deformisanjem, 8. Jugoslovenski simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala, Cavtat (1989.).
- /2/ Golovin V.A., Problema štampueosti pri holodnoj i polugorjačej ob'emnoj štampovke, Kuznečno-štam-povočnoe proizvodstvo, N<sup>o</sup> 8 (1981).
- /3/ Kolmogorov V.L., O plastičnosti i deformiruемости metallov, Kuznečno-štam-povočnoe proizvodstvo, N<sup>o</sup> 8 (1981).
- /4/ Mehanik V.P., Petrov S.S., Problemi osnaščenija gidravličeskih štampov-čnih pressov priborani tehnologičeskogo kontrolja i zaščiti, Kuznečno-štam-povočnoe proizvodstvo, N<sup>o</sup> 8 (1984.).
- /5/ Bogatov A.A., Mižirickij O.I., Smirnov S.V., Resurs plastičnosti metallov pri obrabotke davleniem, Metallurgija, Moskva (1984.).

D.Nikolić

#### SOME BASIC PROBLEMS OF CONTROL OF MACHINES FOR PLASTIC FORMING

##### S u m m a r y

Successful control of machines depends on the solution of some basic problems considered in this paper. In fact, it is important to define and realize the technological parameters and control parameters which exert influence on the possibility of forecasting of work pieces quality as well as on control of forming process in order to realize the desired quality of a work piece.

Mathematical modelling of physical processes of metal condition change, particularly of cavity formation processes and contemporary theory of control and automation represent a basis of this control.



Ž. Mažuran, T. Šurina\*

FLEKSIBILNO POSTROJENJE ZA  
KOVANJE SITNIH OTKIVAKA

Linija za kovanje stolnih noževa koja se sastoji i od tri stroja za deformiranje i dvije peći za toplinsku obradu, treba automatizirati zbog opasnih uvjeta rada. Predlaže se rješenje uvođenjem robotiziranog opsluživanja i povezivanjem pomoću mikroprocesora. Razrađeno je rješenje pomoću tri manipulatora, odabrana je mikroprocesorska konfiguracija a izrađen je programom koji se upravlja linijom.

Automated Line for the Production of a Service Knife.  
In this paper, the actual technology of forging, extruding and forming a service knife from a single bar is described. Here, heat treatment causes additional safety problems and machines are limited in their performances. To solve these problems, the manipulators are introduced in the process, which is integrated by a computer control.

1. Uvod

Pri oblikovanju stolnih noževa moguće je oštricu i dršku zasebno oblikovati pa ih zatim spajati bilo sućeonim zavarivanjem bilo umetanjem oštrice u dršku noža. U ovom radu opisuje se tehnologija izrade drške i oštrice iz jednog komada tako da se prvo otkuje drška, a zatim se iskiva oštrica. U toj tehnologiji se pojavljuju problemi u vezi sa zaštitom pri radu zbog visokih temperatura i pojave štetnih plinova. Osim toga, brzina radnika je limitirajući faktor pri iskorištavanju postojećih strojeva.

---

\* Prof.dr Tugomir Šurina, dipl.inž.stroj. - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
Mr Željko Mažuran, dipl.inž.stroj. - JUGOTURBINA, Karlovac



Zato je potrebno transport obratka u najvećoj mogućoj mjeri zamijeniti upravljivim manipulacijskim uređajima. Budući da je potrebno da postrojenje posjeduje određenu fleksibilnost najpogodniji način realizacije upravljanja manipulacijskim uređajima je kompjutorsko vođenje.

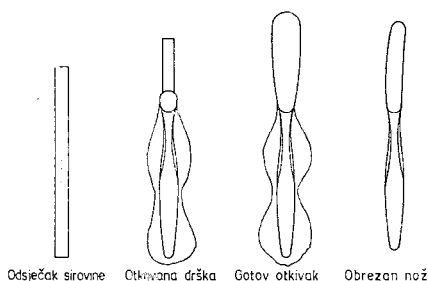
## 2. Opis tehnološkog procesa

Sirovina za izradu kovanog noža je šipka promjera 9-13 mm dužine 4 m izrađena iz Č.4172. Tehnološki postupak izrade kovanog noža, čije su faze prikazane na sl. 1, je slijedeći:

- odsjecanje sirovine,
- kovanje drške,
- iskivanje oštrice i
- obrezivanje gotovog otkivka.

Analizom ovog tehnološkog postupka razrađen je slijedeći modernizirani tehnološki proces izrade stolnih noževa kovanjem:

- brušenje šipke osnovnog materijala brusnim zrnom gradacije 180,
- zagrijavanje šipke na  $820 \pm 20^{\circ}\text{C}$  u indukcionoj peći sa visokofrekventnim generatorom,
- odsjecanje šipke na potrebnu dužinu,
- podmazivanje ukovnja grafitnom emulcijom, kovanje drške i ispuhivanje alata,
- iskivanje oštrice valjanjem na stroju za kovačko valjanje,
- obrezivanje istisnine.



Slika 1

## 3. Izbor manipulatora

Svi manipulatori i roboti zahtijevaju upotrebu pogodnog pogoja i regulacijskog sistema. Uobičajeni pogonski sistemi su hidraulički motori, istosmjerni električni motori, koračni (step) motori i pneumatski izvršni članovi. Hidraulički motori se u novije vrijeme izbacuju iz upotrebe. Novije generacije manipulatora i robota su bazirane većinom na upotrebi koračnih (mali roboti i manipulatori) i istosmjernih motora (veći sistemi),

a tendencija je uvođenje izmjeničnih motora. Pneumatski sistemi se koriste kod jeftinijih uređaja za prenošenje i pozicioniranje, a osnovne prednosti su im kompaktnost i dobra mogućnost upravljanja. Zbog ovih prednosti i relativno niske cijene koštanja, automatizacija ove proizvodne linije je izvedena pneumatskim izvršnim članovima.

#### 4. Automatizacija procesa

Ovom modernizacijom tehnološkog procesa su ostvareni osnovni preduvjeti za automatiziranje izrade stolnih noževa kovanjem. Analizom procesa se uočilo da je za automatsko odvijanje potrebno automatizirati slijedeće operacije:

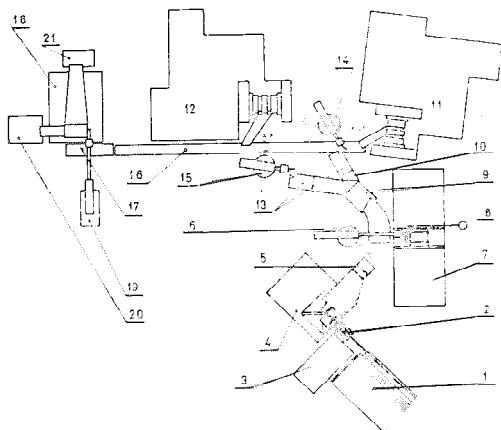
- dodavanje obrušenih šipki iz magazina do ekscentar preša,
- zagrijavanje dijela šipke na određenu temperaturu,
- odsjecanje šipke na potrebnu mjeru,
- prenošenje, držanje i pozicioniranje vrućih komada u alatu za kovanje drške,
- aktiviranje čekića, odnosno samo kovanje drške,
- vađenje otkivka iz alata i prijenos do valjarice,
- ispuhivanje i podmazivanje ukovnja,
- preuzimanje, pozicioniranje i umetanje otkivka u segmente za iskivanje, te pridržavanje za vrijeme iskivanja oštrice,
- prijenos otkivka do ekscentar preše,
- preuzimanje, pozicioniranje i umetanje otkivka u alat za obrezivanje,
- aktiviranje ekscentar preše i držanje na vrijeme obrezivanja i
- prijenos obrezanog otkivka i otpada u primljene sanduke.

##### 4.1. Opis rada automatiziranog procesa

Kod puštanja u rad automatiziranog kovačkog postrojenja (sl.2) prvo se uključuje dobava energije svim uređajima. Nakon uključivanja automatskog režima rada dolazi do izvršenja slijedećih radnji:

- preko senzora se detektira da li postoji šipka osnovne sirovine na transportnim valjcima uređaja za šaržiranje i dodavanje l. Ukoliko nema osnovne sirovine na valjčićima, izdiže se jedan blok valjčića i izvlači se zaostala šipka iz induktora.

Po završenom izvlačenju spušta se blok valjčića, aktivira se izdizač šipki, a ujedno se otpušta stezač osnovne sirovine. Kada senzor dojaví da postoji šipka na valjčićima, steže se stezač osnovne sirovine na pogonskom transportnom valjčiću i šipka putuje do induktora 2 sa visokofrekventnim generatorom 3.



Slika 2

- Obzirom da je ovdje temperatura sirovine niska, optički pirometar to dojavljuje automatu koji isključuje elektromotor za transport osnovne sirovine i vrši se zagrijavanje iste u induktoru 2. Kada je temperatura sirovine  $820^{\circ}\text{C}$ , preko automata se pokreće elektromotor za transport sirovine. Aktiviranjem mikroprekidača na graničniku omogućuje se aktiviranje ekscentar preše 4 i vrši se odsjecanje odsječka koji dolazi u uređaj za kontrolu dužine

odsječka 5 gdje se vrši izbacivanje kraćih odsječaka.

- Ukoliko je odsječak korektan prihvaća ga manipulator M1 6 i unosi u ukovanj zračnog čekića 7. Loše pozicioniran odsječak se ispušta na određeno mjesto nakon naloga automata za upravljanje. Ukovanj se prethodno podmazuje i ispuhuje uređajem za čišćenje i podmazivanje ukovnja 8. Ukoliko je odsječak dobro postavljen, aktivira se zračni čekić i otkiva se drška stolnog noža. Otkivak se vadi iz kovačke gravure i povlači ispred stola čekića gdje se ispušta na limeni ljevak kojim odlazi na transporter T1 9 i preko njega do valjarice V1 11 ili V2 12 zavisno od položaja razdjelnika otkivaka 10. Istovremeno s prijenosom otkivka do valjarice manipulator M1 6 se vraća u početni položaj i prihvaća novi odsječak.
- Po izvršenom pozicioniranju u uređaju za pozicioniranje 13, otkivak preuzimaju manipulatori M2 14 ili M3 15 i vrše iski-vanje oštřice. Dalje otkivak stolnog noža putuje transporterom

T2 16 do uređaja za pozicioniranje 17 ispred ekscentar preše za obrezivanje otkivaka 18.

- Nakon točnog pozicioniranja manipulator M4 19 prihvaća otkivak i prenosi ga u alat za obrezivanje. Poslije dodatnog pozicioniranja i pridržavanja vrši se obrezivanje otkivka i ispuhivanje istisnine kao i vraćanje manipulatora u početni položaj. Obrezani noževi propadaju u pripremljeno spremište 20, a obrezana istisnina limenim ljevkom odlazi do prihvatnog sanduka 21.

Potrebno je uočiti da je istovremeno u procesu više komada pa stanje cijelog procesa treba kontinuirano kontrolirati. U slučaju kvara pojedinog dijela postrojanje potrebno je potpuno zaustaviti rad linije za kovanje kako ne bi došlo do oštećenja ili uništenja pojedinih uređaja.

## 5. Izvedba programabilnog automata

Na temelju općih smjernica u literaturi [2] i [3] te na osnovu još nekih utjecajnih parametara kao što su mogućnosti servisiranja i održavanja, kvaliteta sklopova i mogućnost nadogradnje, izabrana je slijedeća konfiguracija programabilnog automata (PA) za upravljanje manipulacijskim uređajima [4] i [5]:

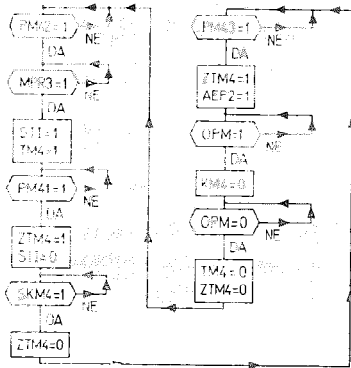
- mikroprocesor INTEL 8085A
- dekodir INTEL 8205
- programabilni brojač-timer INTEL 8253
- ulazno-izlazni sklop INTEL 8212
- radna memorija INTEL 2114

Za navedenu konfiguraciju PA u ovom radu je kao primjer dano upravljanje manipulacijskim uređajima za posluživanje ekscentar preše za obrezivanje otkivaka (sl. 4) i to dijagram toka upravljanja (sl.3), opis rada uređaja, popis potrebnih ulaza (signala) i izlaza (upravljačkih naredbi) te na kraju konkretni program. Program je dan prvo pomoću mnemoničkih kratica naredbi, a zatim je dan heksadecimalni kod instrukcije sa početnom adresom iste.

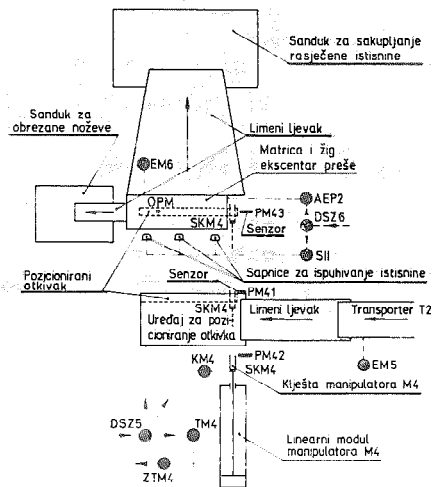
### 5.1. Opis rada uređaja

Prvo se ispituje da li je u uređaj za pozicioniranje stigao novi otkivak. Po ispunjenju ovog uvjeta uključuju se sarnice

za ispuhivanje obrezane istisnine izvrši se translacija manipulatora. Translacija se zaustavlja kada kliješta manipulatora dođu u položaj za prihvaćanje otkivka. Potom se isključuje sapnice za ispuhivanje istisnine. Nakon stezanja otkivka (nalog daje program za upravljanje uređajem za pozicioniranje) isti se translacijom donosi do matrice ekscentar preše. Tada se aktivira ekscentar preša za obrezivanje. Nakon što pridržači u žigu alata prihvate otkivak, otpuštaju se kliješta manipulatora. Po završenom obrezivanju se manipulator vraća u početni položaj.



Slika 3



Slika 4

## 5.2. Popis potrebnih ulaza

- MPR3 - mikroprekidač uređaja za pozicioniranje ispred manipulatora M4
- OPM - odsjecak se dodatno pridržava u matrici ekscentar preše za obrezivanje istisnine
- PM41 - manipulator M4 u položaju za preuzimanje otkivaka
- PM42 - manipulator M4 u početnom položaju
- PM43 - manipulator M4 pozicionirao otkivak u matrici ekscentar preše za obrezivanje istisnine.

## 5.3. Popis potrebnih upravljačkih naredbi

AEP2 - 1: aktiviranje ekscencar preše za obrezivanje istisnine  
0: %

KM4 - 1: stezanje kliješta manipulatora M4  
0: otpuštanje kliješta

SII - 1: aktiviranje sapnica za ispuhivanje obrezane istisnine  
0: prestanak rada sapnica

TM4 - 1: izvlačenje klipa translacijskog modula manipulatora M4  
0: uvlačenje klipa

ZTM4 - 1: prekid izvršenja naredbe TM4 = 1  
0: nastavak izvršenja TM4 = 1

**NAPOMENA:** Prekid izvršenja naredbe ne znači njeno resetiranje  
(na nivo 0), već zaustavljanje odgovarajućeg pokreta.  
Prekid nije vraćanje u početni položaj već se zadržava trenutni položaj modula.

PADR9	LXI H, RAD9	10	OE3A: 21 20 18	LBL905	LXI, LBL905	10	OE88: 21 88 OE
	MVI M, FF	10	OE3D: 36 FF		IN 13	10	OE8B: D8 13
	LHLD ADR9	16	OE3F: 29 21 18		ANI 04	7	OE8D: E6 04
	PCHL	6	OE42: E9		JZ RETURN9	7/10	OE8F: CA D1 OE
LBL901	LXI H, LBL901	10	OE43: 21 43 OE		LDA OUT9	13	OE92: 3A 23 18
	IN 13	10	OE46: DB 13		ORI OA	7	OE95: F6 OA
	ANI 02	7	OE48: E6 02		OUT 08	10	OE97: D3 08
	JZ RETURN9	7/10	OE4A: CA D1 OE		STA OUT9	13	OE99: 32 23 18
LBL902	LXI H, LBL902	10	OE4D: 21 4D OE	LBL906	LXI, H, LBL906	10	OE9C: 21 9C OE
	IN 13	10	OE50: DB 13		IN 13	10	OE9E: D8 13
	ANI 10	7	OE52: E6 10		ANI 20	7	OE9F: E6 20
	JZ RETURN9	7/10	OE54: CA D1 OE		JZ RETURN9	7/10	OE9A: CA D1 OE
	LDA OUT 9	13	OE57: 3A 23 18		LDA OUT9	13	OE96: 3A 23 18
	ORI 11	7	OE5A: F6 11		ANI FB	7	OE99: E6 FB
	OUT 08	10	OE5C: D3 08		OUT 08	10	OE9B: D3 08
	STA OUT9	13	OE5E: 32 23 18		STA OUT9	13	OE9D: 32 23 18
LBL903	LXI H, LBL903	10	OE61: 21 61 OE	LBL907	LXI H, LBL907	10	OE90: 21 60 OE
	IN 13	10	OE64: DB 13		IN 13	10	OE93: DB 13
	RAR	4	OE66: 1F		ANI 20	7	OE95: E6 20
	JNC RETURN 9	7/10	OE67: D2 D1 OE		JNZ RETURN9	7/10	OE97: C2 D1 OE
	LDA OUT9	13	OE6A: 3A 23 18		LDA OUT9	13	OE9A: 3A 23 18
	ORI 02	7	OE6D: F6 02		ANI FC	7	OE9D: E6 FC
	OUT 08	10	OE6F: D3 08		OUT 08	10	OE9F: D3 08
	STA OUT9	13	OE71: 32 23 18		STA OUT9	13	OE91: 32 23 18
LBL904	LXI H, LBL904	10	OE74: 21 74 OE		MVI A, FF	7	OE94: 3E FF
	IN 13	10	OE77: D8 13		LXI H, RAD9	10	OE96: 21 20 18
	ANI 08	7	OE79: E6 08		MVI M, 00	10	OE99: 36 00
	JZ RETURN9	7/10	OE8F: CA D1 OE		LXI H, LBL901	10	OE9B: 21 43 OE
	LDA OUT9	13	OE92: 3A 23 18		JMP RET9	10	OE9E: C3 D3 OE
	ANI ED	7	OE81: E6 ED		RETURN9 MVI A, 00	7	OED1: 3E 00
	OUT 08	7/10	OE83: D3 08		RET9 SHLD ADR9	16	OED3: 22 21 18
	STA OUT9	13	OE85: 32 23 18		RET	10	OED6: C9

## 6. Zaključak

U ovom radu je dan prijedlog automatskog vođenja procesa kovanja stolnih noževa pomoću mikroprocesora. Na osnovu moderniziranog tehnološkog procesa razrađene su mogućnosti automatizacije kovačnice i idejno je riješeno upravljanje jednim uređajem u vidu algoritma za PA. Na temelju općih smjernica i posebnih zahtjeva izabrana je najpovoljnija konfiguracija automata. Oda brani su sklopovi renomiranog proizvođača INTEL i to zbog niske cijene koštanja, velike pouzdanosti pri radu razgranate servisne mreže itd. Sam program za upravljanje je riješen tako da koristi najpogodnije karakteristike danas poznatih načina povezivanja procesa s kompjutorom.

Projektirani programabilni automat, se prije svega odlikuje velikom točnošću, brzinom i pouzdanošću pri radu. Osim toga posjeduje relativno visok stupanj fleksibilnosti, a sve to uz relativno nisku cijenu koštanja.

## LITERATURA

- 1 T. Šurina, D. Sišćan, Ž. Mažuran, "Automatizacija linije za kovanje stolnih noževa", Zbornik radova JUREMA 33(1988), svezak 4, 323-327, Zagreb, 1988.
- 2 B. Souček, "Mikroprocesori i mikroracunala", Tehnička knjiga, Zagreb, 1978.
- 3 A. V. Kochhar, "Mikroprocessors and their Manufacturing Applications", Edward Arnold Ltd., London, 1983.
- 4 ... MCS-85 Users Manual, Intel Corporation, Santa Clara, 1987.
- 5 C.A. Titus, P.R. Rony, D.G.Larsen, J.A.Titus, "8080/8085A Software Design", Howard W. Sams & Co. Inc., Indianapolis, 1978.

D. Nikolić<sup>x)</sup>

SISTEMI UPRAVLJANJA MAŠINAMA ZA ZAPREMINSKO  
OBLIKOVANJE PLASTIČNIM DEFORMISANJEM<sup>xx)</sup>

1. UVOD

Savremenu mašingradnju karakteriše više osnovnih pokazatelja, najvažniji su: ekonomičnost, visoka proizvodnost i visok kvalitet proizvoda. Kvalitetni proizvodi moraju, pored ostalog, imati odgovarajuću pouzdanost, funkcionalnost, trajnost itd. Kvalitet proizvoda prvenstveno zavisi od kvaliteta njegovih delova. Kvalitet delova se, pored tačnosti dimenzija, položaja i kvaliteta površina, utvrđuje na osnovu: statičkih i dinamičkih karakteristika; makro, mikro i submikro strukture materijala itd. Odnosno, kvalitetan deo je svaki onaj koji pouzdano, trajno i uspešno obavlja svoju funkciju u proizvodnji.

Do nedavno pri projektovanju i konstruisanju proizvoda i projektovanju tehnologije uvažavan je princip: "... prevladati opasnost od otkaza...", koji je i danas aktuelan stim što se proširuje i parametrima: vreme rada do početka prskotine, vreme rasta - širenja i dopuštenih veličina prskotina. Međutim, u nekim industrijski razvijenim zemljama (npr. SAD) sve više se uvažava princip "... da do razaranja neminovno mora doći ali osnovno je preduzeti sve mere da do toga dodje posle dovoljno dugog vremena eksploacije proizvoda". /1/.

<sup>x)</sup> Prof. Dr Dragomir Nikolić, Mašinski fakultet - Beograd, 27. Marta br. 80.

<sup>xx)</sup> Radjeno u okviru projekta "Razvoj specijalnih tehnologija oblikovanja metala u tečnom i plastičnom stanju" - koji je finansiran od Republičke zajednice nauka - Srbije.



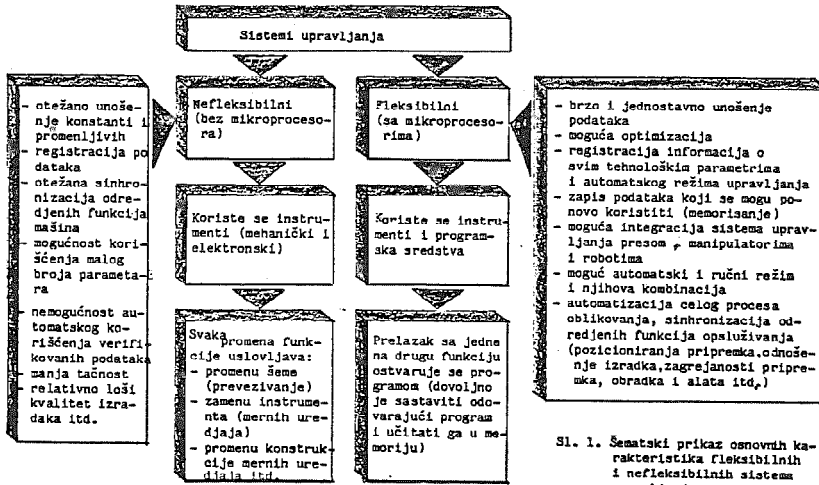
Svi materijali koji se danas koriste u mašinogradnji imaju nedostataka (pukotina i dr.) nastalih pri izradi polufabrikata. Prisustvo tih nedostataka može se prihvatiti samo pod uslovom da se njihova veličina može pouzdano utvrditi i kontrolisati u procesu oblikovanja, pomoću vremena početka rasta postojećih ili pojave novih prskotina, brzine rasta (širenja) prskotina i granične - dozvoljene njihove veličine. Kontrola i utvrđivanje navedenih parametara nastalih u procesu oblikovanja delova proizvoda je vrlo skupo. Zato utvrđivanje tehnoloških parametara koji obezbeđuju zadovoljavajuće veličine gornjih parametara je vrlo odgovoran i sličan zadatak. Pri rešavanju ovog zadatka, vrlo često, se manje vodi računa o visini kvaliteta a znatno više o njegovoj stabilnosti, koja se može postići neophodnom stabilnošću određenih tehnoloških parametara. Zadovoljavajuća stabilnost tehnoloških parametara može se postići samo korišćenjem mašina sa odgovarajućim tehničko-tehnološkim karakteristikama i efikasnim sistemom upravljanja. Međutim, ni jedno ni drugo, pogotovu kod nas, je, zasada, teško ostvarljivo. Osnovni razlozi su: postojeće mašine za zapreminsko oblikovanje su čitoka namena pa zato mogući tehnološki parametri su vrlo često van onih koji omogućavaju odgovarajuću stabilnost i nerazvijeni sistemi upravljanja. U ovom radu će se izmeniti neki rezultati rada na Mašinskom fakultetu u Beogradu na razvijanju jednog fleksibilnog sistema upravljanja.

## 2. OSNOVNA OBELEŽJA SISTEMA UPRAVLJANJA

Mogući sistemi upravljanja obradnih sistema za zapreminsko oblikovanje plastičnim deformisanjem mogu se podeliti u dve osnovne kategorije (uslovno nazvane): fleksibilne i nefleksibilne. Neki teorijski aspekti dati su u radu /2/. Osnovna obeležja ovih sistema su data na sl. 1. Pored karakteristika datih na ovoj slici fleksibilni sistemi upravljanja, u odnosu na nefleksibilne, imaju sledeća preimućstva:

- Mogućnost korišćenja znatno većeg broja parametara i funkcija,
- Znatno veće funkcionalne mogućnosti: memorisanje velikog broja informacija (tel. parametara i dr.), izvršenje neophodnih proračuna, ostvarivanje statističke obrade podataka, izdavanje informacija u prikladnom obliku (displej, traci, grafički itd.),
- Proračun osnovnih parametara mogućih preopterećenja, memorisanje svih parametara pri kojima može doći ili je došlo do preopterećenja, što je izuzetno značajno za pouzdanost obradnog sistema pri oblikovanju izradaka velikih dimenzija i povišene tačnosti,

- Mogućnost kompletne optimizacije procesa oblikovanja plastičnim deformisanjem, odnosno ne samo izbor najboljih rešenja po svim parametrima već i ostvarenja preduslova za kompleksnu automatizaciju tj. objedinjavanje ovih parametara u jedinstven sistem sa suštinskim medjusobnim vezama,



Sl. 1. Šematski prikaz osnovnih karakteristika fleksibilnih i nefleksibilnih sistema upravljanja

- Mogućnost integracije u više sistema upravljanja (tehnološkog sistema),
- Olakšana razrada tipskih tehnologija uvažavajući pre svega specifične tehničko-tehnološke karakteristike mašine,
- Obezbedjenje optimalnih termo-mehaničkih parametara procesa oblikovanja,
- Uredjaj je znatno manjih dimenzija i obezbedjuje povećanje funkcionalne pouzdanosti obradnih sistema,
- Izuzetno velika brzina ostvarenja svih funkcija,
- Znatno prostiju i pouzdaniju registraciju polaznih parametara, izmerenih veličina (u toku i na kraju merenja), izbor razmere za grafičke prikaze i dr,
- Značajno povećanje kvaliteta izratka, pre svega njegove stabilnosti,
- Znatno poboljšanje radnih uslova.

### 3. NEFLEKSIBILNI SISTEMI UPRAVLJANJA HIDRAULIČNIM PRESAMA

Stečena iskustva u korišćenju hidrauličnih presa namenjenih za zapreminsko oblikovanje ukazuju da efikasnost njihovog rada bitno zavisi od tehničko-tehnoloških karakteristika i opremljenosti uređajima i instrumentima za kontrolu tehnoloških parametara i zaštitu presa. Savremene tendencije proširenja tehnoloških mogućnosti i korišćenja novih tehnologija (izotermičko, oblikovanje u uslovima superplastičnosti, zatim, u uslovima puzanja, upravljanja silama trenja itd.) još više zaoštravaju pitanja razvoja sistema kontrole, upravljanja i sistema zaštite. U nas najčešće se primenjuju samo osnovni instrumenti i to, po pravilu, samo na pojedinim hidrauličnim preesama a veći broj je sa nedopustivo malim brojem instrumenata ili čak bez njih. Ako se i koriste obično su licencnog karaktera.

Nefleksibilni sistem upravljanja uglavnom čine instrumenti i uređaji koji omogućavaju:

- i) merenje brzina osnovnih izvršnih organa prese i pritisaka,
- ii) indikaciju položaja osnovnih pokretnih delova prese,
- iii) registraciju najčešće pomoću pisača: brzina, pritisaka, položaja odredjenih organa, trenutak nastanka preopterećenja, ekscentričnost opterećenja i sl.
- iv) zaštitu od preopterećenja i havarija,
- v) olakšano utvrđivanje uzroka nastanka škarta,
- vi) kontrolu opslužilaca presa,
- vii) registraciju podataka neophodnih za ocenu pohabanosti delova presa,
- viii) značajno povećanje efikasnosti korišćenja presa.

Oblik izlaza iz ovakvog sistema može biti: digitalni - pritisci, naponi, pomeranja, brzine, položaji, broj opterećenja i preopterećenja itd.; zvučni i svetlosni - preopterećenja; grafički - brzina, pomeranja, pritisci, odstupanja od repernih podataka, elementi za korekciju itd.

### 4. FLEKSIBILNI SISTEMI UPRAVLJANJA HIDRAULIČNIM PRESAMA

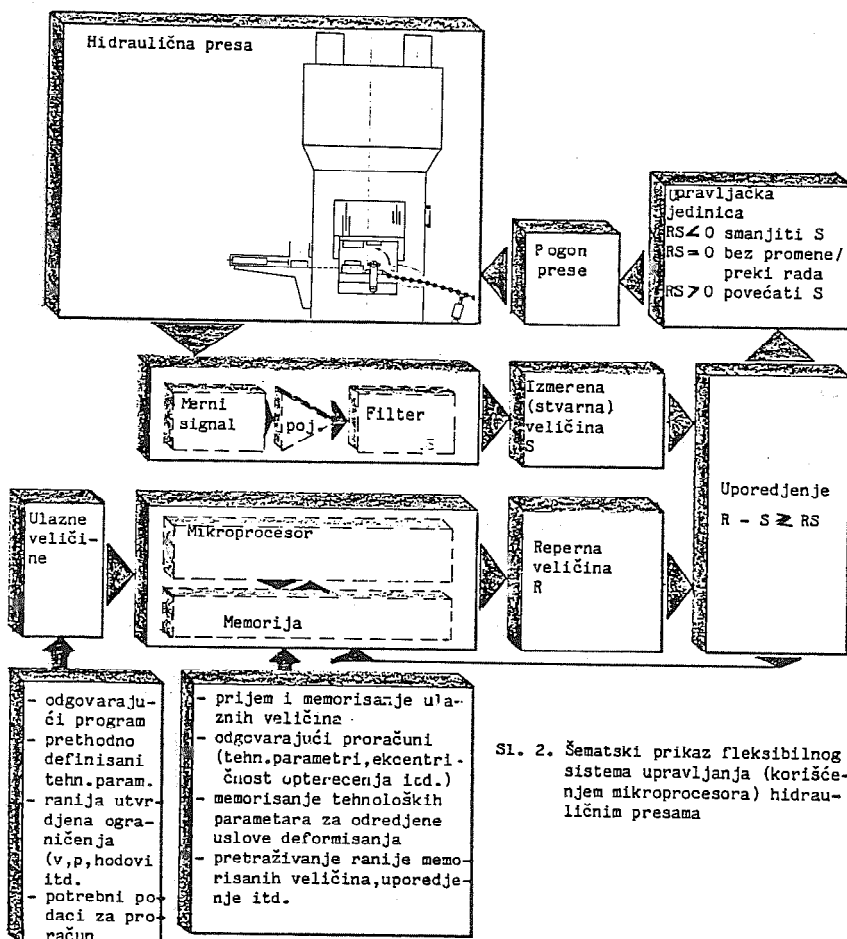
Razvoj i primena novih tehnologija zapreminskog oblikovanja (izotermičko, superplastično i dr.) kao i sve oštriji zahtevi u ostvarenju nekih od tehnoloških parametara (kao npr.: odredjene temperaturske promene  $\pm 5$  do  $\pm 7^{\circ}\text{C}$ ; neophodnost povećanja tačnosti merenja - pomeranja i dr. i do 0,1 mm

itd.) su izuzetno zaoštrili problem razvoja hidrauličnih presa i sistema upravljanja. U ovom radu, kao što i njegov naziv indicira, biće reči samo o nekim aspektima razvoja sistema upravljanja. Kompleksnost problema razvoja sistema upravljanja uslovljava: nestacionarnost tehnoloških parametara, postojanje faktora koji se ne mogu kontrolisati, složenost zavisnosti između ulaznih i izlaznih parametara procesa oblikovanja, inertnost signala u sistemu upravljanja i dr. Dalje poteškoće, nešto detaljnije su date u radu /2/, se sažeto mogu iskazati kao što sledi:

- i) Ograničene informacije o plastičnosti i dr. mnogih materijala u konkretnim proizvodnim uslovima,
- ii) Nedostatak pouzdanih pokazatelja uticaja tehnoloških parametara na kvalitet izradaka, prvenstveno na narušavanje njegove čvrstoće (nastanak prskotina, dopuštene njihove veličine i dr.),
- iii) Mnoštvo različitih tehnoloških parametara promenljivih sa vremenom, uslovno moguća optimizacija parametara matematičkim metodama (odredjivanjem ekstreme funkcije cilja) i složenost prilagodjavanja tehničko-tehnološkim karakteristikama obradnog sistema,
- iv) Hidraulične prese su sistemi sa vrlo širokim opsegom promena tehnoloških parametara zbog nedostatka matematičkog modela, nerazvijene metodike optimizacije njenih parametara i složenosti osnovnog obradnog procesa (proces oblikovanja) čini problem izuzetno složenim.

Fleksibilni sistemi su, pored ostalog, zasnovani na principu povratne sprege. Njihova suština se sastoji u uporedjenju potrebne regulišuće veličine (upravljajućih procesa) sa ostvarenom njenom veličinom u procesu. Razlika ovih veličina se koristi za ostvarenje regulišućeg dejstva na mašinu. Princip formiranja fleksibilnog sistema upravljanja hidrauličnim presama prikazan je na slici 2. Broj veličina R i S, njihova priroda i karakteristike, zavise od metode oblikovanja, broja ulaza i izlaza sistema i raspoložive memorije mikro procesora. Kao primer daju se samo neke informacije o radu na razvoju ovakvog sistema upravljanja pri oblikovanju u uslovima superplastičnosti i upravljanja silama trenja.

Oblikovanje u uslovima superplastičnosti se ostvaruju sa izuzetno visokim stepenima deformacije, u nekim slučajevima i višestruko većim, i sa izuzetno malim deformacionim otporima čak i nekoliko puta manjim u odnosu na klasično /3/. Ovakvo oblikovanje se može ostvariti u temperaturno-brzinskim intervalima u kojima se u potpunosti ostvaruju fazne transformacije u materi-



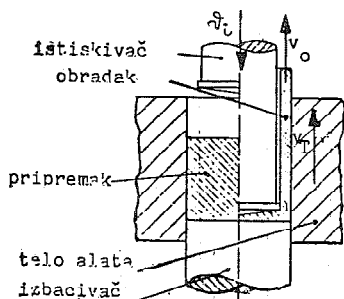
Sl. 2. Šematski prikaz fleksibilnog sistema upravljanja (korišćenjem mikroprocesora) hidrauličnim presama

jalu ili pod sledećim uslovima: obezbeđenja vrlo sitnozrne strukture materijala priprema - dimenzija manjih od  $10 \mu\text{m}$ , vrlo malim brzinama deformacija - po pravilu u intervalu  $10^{-2} - 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  i održavanju dovoljno visoke temperature alata i obratka -  $(0,5 - 0,7) T_{\text{top}}$  (temperature topljenja). Oblikovanjem u uslovima superplastičnosti dobijaju se izradci povišenog kvaliteta, jer se obezbeđuje homogena mikro i makrostruktura, niski zaostali naponi, visoka čvrstoća i plastičnost.

Jedan od najvećih problema oblikovanja u uslovima superplastičnosti je stvaranje mikroprskotina (kavitacije) i porast mikrošupljina u materijalu obratka. Pri stvaranju mikroprskotina nastaje oslobađanje energije i emitovanje zvuka /4/. Identifikacija psotojanja emije zvuka - korišćenjem ultrazvučne analize (veličine talasa, spektra frekvence i forme) on line tehnikom

omogućava upravljanje procesom oblikovanja. Na osnovu karakteristika ultrazvučnog signala vrši se korekcija brzine deformisanja, odnosno brzine deformacije. Modelskim ispitivanjima uspostavljaju se korelacije između procesa oblikovanja, formiranja prskotina i kvaliteta izradka.

Poslednjih godina sve više se koriste metode oblikovanja sa aktivnim silama trenja. Šema procesa prikazana je na slici 3.



Sl. 3. Istiskivanje sa pomerljivim telom alata

Suština procesa se sastoji u sledećem - telo alata u procesu se kreće u pravcu kretanja mase obratka brzinom -  $v_T$  a brzina kretanja mase obratka -  $v_0$ , ukoliko je  $v_T > v_0$  na površinama dodira obratka i alata pojaviće se aktivne sile trenja. U ovakvom procesu oblikovanja ostvaruje se: ravnomerna deformacija obratka, veći stepen deformisanja u jednoj operaciji (bez nastanka prskotina), veća postojanost alata - naročito istiskivača, smanjen specifični deformacioni otpor - za 20 - 40% u odnosu na oblikovanje u alatu sa nepokretnim telom. Osnovni parametri upravljanja su brzina materijala obratka  $v_0$  i

brzina kretanja tela alata  $v_T$ .

## 5. ZAKLJUČAK

1. Zadovoljavajuća stabilnost kvaliteta izradaka, kao osnove kvaliteta proizvoda, može se ostvariti samo odgovarajućom stabilnošću tehnoloških parametara procesa oblikovanja ostvarljivom u obradnom sistemu sa pogodnim tehničko-tehnološkim parametrima i sistemima upravljanja.

2. Fleksibilni sistemi imaju izuzetno mnogo prednosti nad nefleksibilnim i omogućavaju efikasno i pouzdano upravljanje kvalitetom izradaka a time i proizvoda.

3. Ukoliko se želi povećanje kvaliteta proizvoda naša mašinogradnja mora razviti i proizvoditi (ili nabaviti) obradne sisteme sa pogodnim tehničko-tehnološkim karakteristikama i odgovarajućim sistemima upravljanja. Opisani fleksibilni sistem upravljanja, čiji razvoj je u završnoj fazi, je dovoljno prilagodljiv čitavom nizu metoda oblikovanja i obradnih sistema i to ka-

ko postojećih tako i onima u budućnosti, prirodno sa odgovarajućim prilagodjavanjima.

#### REFERENCE

- /1/ Deformacija i svojstva materialov dija aviacionnoj i kosbičeskoj tehniki, Trudi međunarodnoj konferencii, Houldsworth 1977, Metallurgija, Moskva (1982.).
- /2/ D. Nikolić, Osnovni problemi upravljanja obradnim sistemima zapreminskog oblikovanja plastičnim deformisanjem, Zbornik na trudovi XXII Jugoslovensko sovetovanje na proizvodstveno mašinstvo, Ohrid (1989.).
- /3/ Ja. M. Ohrimenko, Soveršenstvovanie tehnologii izotermičeskoj šampovki v sostojanii sverhplastičnosti, Kuznečno-šampovočnoe proizvodstvo N<sup>o</sup> 8 (1981.).
- /4/ D. Dornfeld, Application of Acoustic Emission Monitoring in Forming Superplastic Materials, Review of Research on Sensors, Signal Processing and Control for Manufacturing Automation, Laboratory for Manufacturing Automation, University of California, Berkeley (1988.).
- /5/ A.T. Ovčinnikov, A.M. Dmitriev, Holodnoe vidavlenie polih cilindričeskih izdelij s aktivnimi silami trenija, Kuznečno-šampovočnoe proizvodstvo, N<sup>o</sup> 6 (1981.).

D. Nikolić

#### SYSTEMS FOR CONTROL OF DIE-FORMING MACHINES

##### Summary

All systems for control of die-forming machines are divided into two groups: non-flexible and flexible. Their main characteristics and the corresponding comparisons are considered in the paper. Special attention has been paid to the development of flexible systems and their application in hydraulic presses control during forming of superplastic materials and control of friction forces.