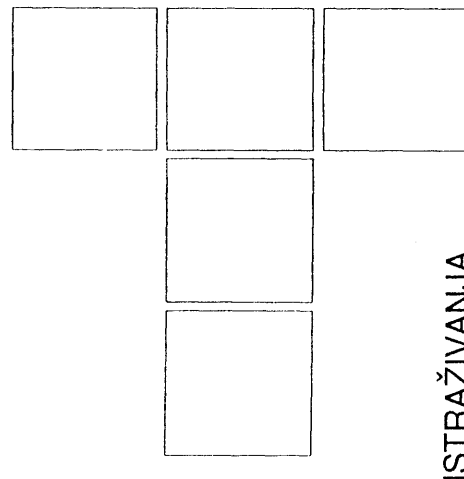


Uticaj geometrije i kontaktnih uslova pri modeliranju toplog sabijanja*



1. UVOD

Sabijanje se redovno razmatra kao klasičan primer analize procesa zapreminskog hladnog ili toplog oblikovanja. Mehanička analiza procesa sabijanja obuhvata između ostalog i uticaj trenja između materijala i alata i klizanje na kontaktnim površinama. U radu su prikazani rezultati fizičkog modeliranja procesa toplog sabijanja korišćenjem plastelinskih višebojnih modela, kod kojih je variran odnos visine i prečnika. Korišćenje plastelina kao modelnog materijala moguće je zahvaljujući sličnosti statičkih i dinamičkih osobina plastelina na sobnoj temperaturi i čelika na temperaturi kovanja.

2. UTICAJ KONTAKTNOG TRENJA

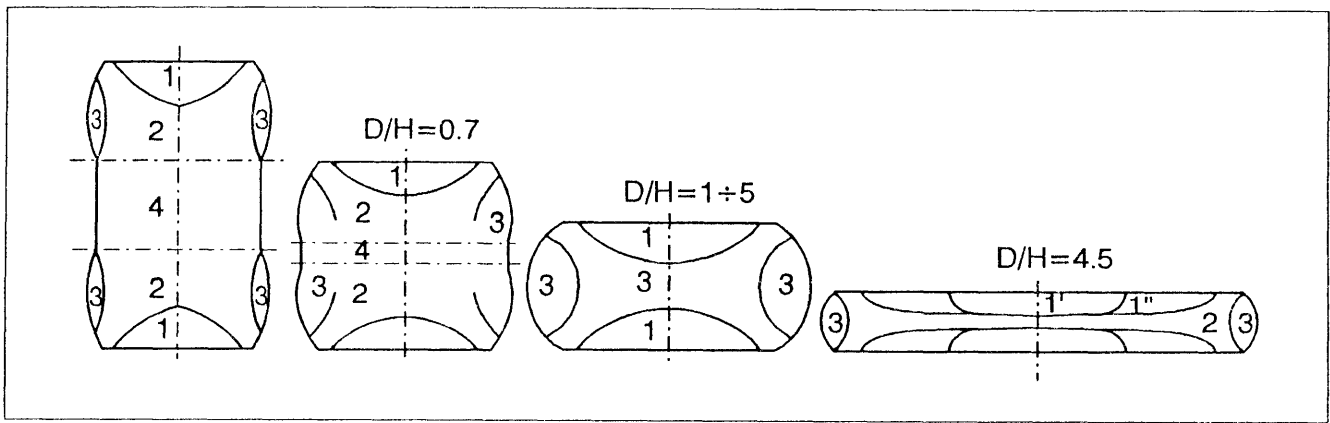
Prisustvo trenja na kontaktnim površinama između alata i materijala dovodi do sledećih pojava: deformisana zapremina deli se na više oblasti, specifični pritisak na kontaktnoj površini nije konstantan, dolazi do pojave dopunskih napona.

Pri sabijanju tela između ravnih površina alata usled prisustva trenja na kontaktnim površinama materijala i alata dolazi do neravnomernog deformisanja. Broj zona, u okviru kojih se uočavaju bliske vrednosti iznosa ostvarenih deformacija, zavisi od trenutnog odnosa prečnika i visine tela koje se sabija. Pri odnosu $D/H=0.4-0.7$ deformisana zapremina se deli na četiri zone (slika 1). Zona 1 predstavlja oblast otežanog deformisanja, zahvaljujući silama trenja. U ovoj oblasti javljaju se najmanje vrednosti deformacija. U dodiru sa njom je zona 2 u kojoj nastaju najveće plastične deformacije i gde je pravac tečenja materijala pod uglom 45° u odnosu na pravac dejstvujućih sila, ili pod uglom koji je blizak prethodnom.

Prof. dr Milentije Stefanović, dipl.ing.,
Mr Vesna Vasiljević, dipl. ing.,
Mašinski fakultet, Kragujevac

U zoni 3 javljaju se nešto manje deformacije u poređenju sa zonom 2 i karakteristična je po ispupčenoj bočnoj površini. Između zona 2 nastaje zona 4, koja se karakteriše najpravnomernijom raspodelom deformacija čiji iznosi imaju vrednosti manje nego u zoni 2, a veće nego u zoni 1. Naponska šema u ovoj oblasti je približno jednosa. Kod tela koja imaju veliku visinu uvek se javlja dvojnica ispupčenost na bočnoj površini, kako je to prikazano na slici 1. Ova pojava se gubi pri odnosu $H/D=0.7$ do 0.8 , pri čemu se potpuno gubi zona 4, a zone 2 se objedinjuju u jednu obrazujuću u meridijalnom preseku krstasti oblik. Sa povećanjem vrednosti odnosa prečnika i visine (npr. $D/H=4.5$), dolazi do deformisanja zone 1, i to njene periferne oblasti dok centralni deo ostaje veoma malo deformisan (zona 1").

Raspored specifičnih pritisaka, zbog prisustva trenja, ima izraženu neravnomernost po kontaktnoj površini. Značajan uticaj na raspored specifičnih pritisaka ima odnos visine i prečnika tela, odnosno, stepen ostvarene deformacije u toku sabijanja. Sa promenom odnosa D/H menja se uticaj trenja na kontaktnim površinama, što se direktno odražava na iznose normalnih napona, kako je prikazano na slici 2 [2]. Eksperimentalno je utvrđena zavisnost normalnog napona σ_z na kontaktnoj površini pri sabijanju priprema od čelika ($0.091\% C$), na temperaturi $1323^\circ K$ i početnom odnosu $D/H=0.67$. Pri ostvarenom stepenu deformacije $\varphi = -0.41$, tj. kada je trenutni odnos $D/H \approx 1$, normalni napon na kontaktnoj površini ima minimum na osi simetrije. Sa daljim povećanjem vrednosti odnosa D/H , pri deformaciji $\varphi = -0.69$, grafik zavisnosti normalnog napona duž kontaktne površine ima lokalni maksimum na osi simetrije i glavnu maksimalnu vrednost na krajevima površine. U ovom slučaju je ostvarena najpravnomernija raspodela normalnog napona, odnosno specifičnog pritiska na površini kontakta materijala i alata. Pri velikim vrednostima odnosa D/H ($\varphi = -1.07$) dobija se raspodela napona σ_z slična onoj koja se dobija primenom inženjerske metode. Naime, maksi-



Sl. 1. Raspored zona deformisanja pri različitim odnosima D/H za proces sabijanja [1]
 Distribution of deformation zones for different ratios D/H for the compression process
 Распределение областей деформирования при различных отношениях D/H
 для процесса обработки осадкой

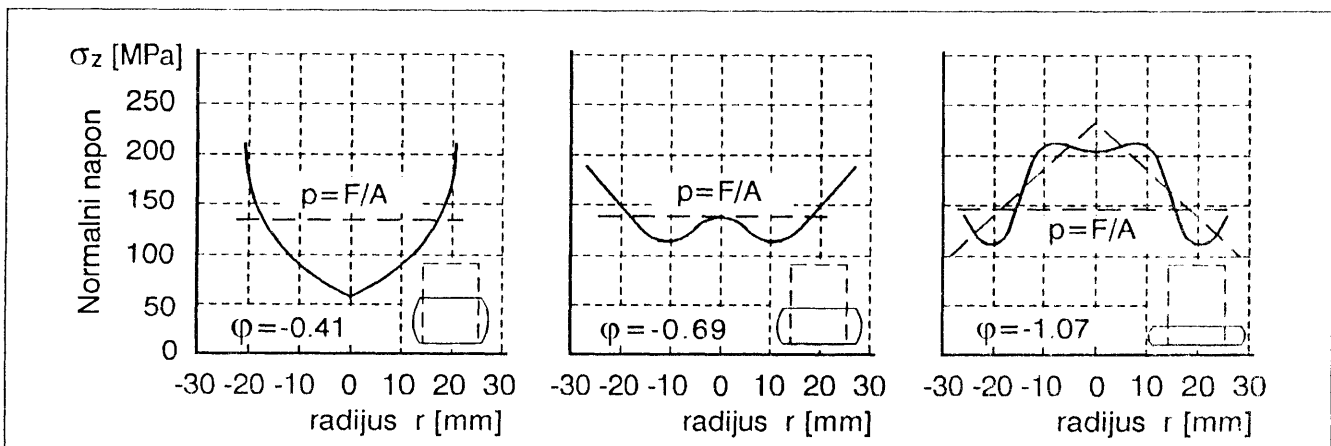
malna vrednost normalnog napona javlja se u blizini ose simetrije, izuzimajući vrednost lokalnog minimuma na samoj osi simetrije. Ovakve raspodele napona mogu se tumačiti različitim uticajem trenja pri različitim vrednostima D/H , kao i pojavom tzv. kontaktnog klizanja na površini dodira sa alatom u određenoj fazi sabijanja.

Klizanje na kontaktnim površinama nastaje samo pri određenoj visini deformisanog tela. Iz literature je poznato da se to klizanje javlja tek pri odnosu $D/H > 1$ [2]. To se objašnjava činjenicom da pri sabijanju smanjenje bočne površine proističe brže nego povećanje kontaktne površine do određene granice, do prethodno navedene vrednosti odnosa D/H . Međutim, ova vrednost se ne može smatrati potpuno ekzaktnom, s obzirom da se primenom različitih maziva može uticati na uslove koji omogućuju ili sprečavaju klizanje materijala na kontaktnoj površini. Nakon početka klizanja materijala na kontaktnoj površini, sa daljim smanjenjem visine tela, dolazi do pojave prelaska dela bočne površine u kontaktnu površinu. Do toga dolazi pri velikim odnosima D/H .

Pojava dopunskih napona usled neravnomernog deformisanja posledica je trenja na kontaktnim površinama. Telo koje se deformiše predstavlja celinu u okviru koje zone tela koje se više deformišu teže da prenesu deo deformacije na susedne zone koje se manje deformišu, i obrnuto. To izaziva pojavu uzajamno uravnotežujućih napona, tzv. dopunskih napona u materijalu. Pri analizi šeme osnovnih glavnih napona mora se uzeti u obzir uticaj dopunskih napona (kod procesa sabijanja, u zoni 3 javljaju se ovi naponi).

Na veličinu elementarnih sila trenja na kontaktnoj površini, nastalih pri plastičnom deformisanju, utiče više faktora: stanje površina alata, stanje kontaktnih površina tela koje se deformiše, hemijski sastav površine kontakta tela, temperatura tela, brzina deformisanja, karakter deformisanja itd.

Poznato je da su kod finije obrađenih površina alata sile trenja manje i obrnuto. Pored toga, veličina sile trenja je različita i zavisi od pravca kretanja materijala po kontaktnoj površini i pravca obrade površine alata. Ova pojava



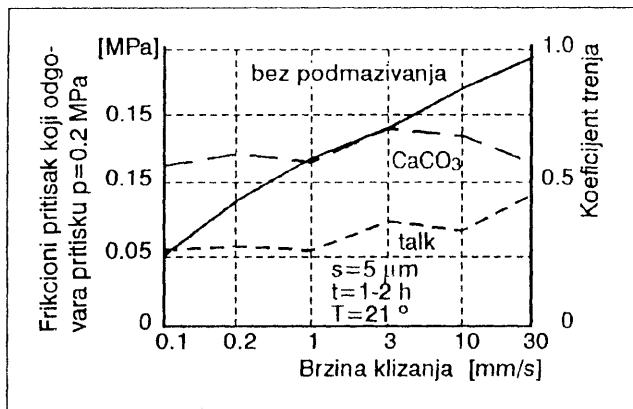
Sl. 2. Raspored normalnog napona na kontaktnoj površini pri osnosimetričnom sabijanju
 (čelik sa 0.091% C, $T=1323^{\circ}\text{K}$, $h_0=60\text{ mm}$, $d_0/h_0=0.67$) [2]
 Distribution of the normal stress on the contact surface for axisymmetric
 compression. (Steel with 0.091 % C, $T=1323\text{ K}$, $h=60\text{ mm}$, $d/h=0.67$)
 Распределение нормального напряжения по поверхности контакта при
 осесиметричной осадке (сталь с 0.091% C, $T=1323^{\circ}\text{K}$, $h_0=60\text{ mm}$, $d_0/h_0=0.67$)

se naziva anizotropija trenja. Ona je posebno izražena u uslovima povišene hrapavosti alata i obradi u toplom stanju. Postojanje anizotropije trenja može pri plastičnom deformisanju dovesti do neočekivane promene oblika tela. Na primer, pri sabijanju cilindra, kontaktna površina priprema nakon deformisanja može biti eliptična [7].

Korišćenjem maziva može se na određen način uticati na tečenje materijala pri deformisanju.

3. EKSPERIMENTALNI RAD

Simulacija procesa toplog sabijanja izvedena je pomoću višebojnih plastelinskih cilindričnih modela. S obzirom da plastelin ima slične statičke i dinamičke osobine sa čelikom na povišenim temperaturama, uspešno se koristi za simulaciju procesa tople zapreminske obrade. Na deformisanje materijala i napone koji nastaju u njemu usled deformisanja, osim statičkih i dinamičkih osobina, veliki uticaj ima trenje između plastelina i metalne površine. Ispitivanjem uticaja trenja na iznose napona u plastelinu, pri različitim mazivima i brzinama klizanja dobijaju se odnosi kao na slici 3 [3]. U procesima kovanja najčešće se pri obradi ostvaruje trenje sa koeficijentom 0.4, tako da je u eksperimentu sabijanja plastelinskih modela korišćen talk kao mazivno sredstvo.



Sl. 3. Razlika u trenju između plastelina i metala pri različitim mazivima i zavisnost od brzine klizanja [3]
 Difference in friction between the plasticine and metal for different lubricants and dependence on sliding speed
 Разница в трении между пластелином и металлом при использовании различных смазок в зависимости от скорости скольжения

U eksperimentu su korišćene dve vrste cilindričnih modela: višebojni modeli sa prostornom koordinatnom mrežom i višeslojni modeli. Modeli se pripremaju na

Tabela 1.

Broj modela	Opis operacije deformisanja	Metoda analize deformacija	Mere priprema (modela)	Ukupno skraćenje δ (%)	Eksper. deform. sila
1	sabijanje ($h_{sab}=26.3$ mm)	koordinatne mreže	36x42 mm	37.4	18 daN
2	sabijanje ($h_{sab}=44.2$ mm)	koordinatne mreže	42x63 mm	28.8	26 daN
3	sabijanje ($h_{sab}=53.3$ mm)	višeslojni modeli	36X84 mm	36.5	21daN

poseban način [5, 6], od više boja plastelina. Početne mere modela su date u tabeli 1.

Pripremljeni modeli su sabijani između dve paralelne glatke metalne ploče pri temperaturi 20°C i brzini deformisanja 5mm/min. Nakon sabijanja modeli su rasečeni duž meridijalne ravni na alatu za sečenje plastelina sa žicom. Izgled modela u meridijalnoj ravni dat je na slici 4.

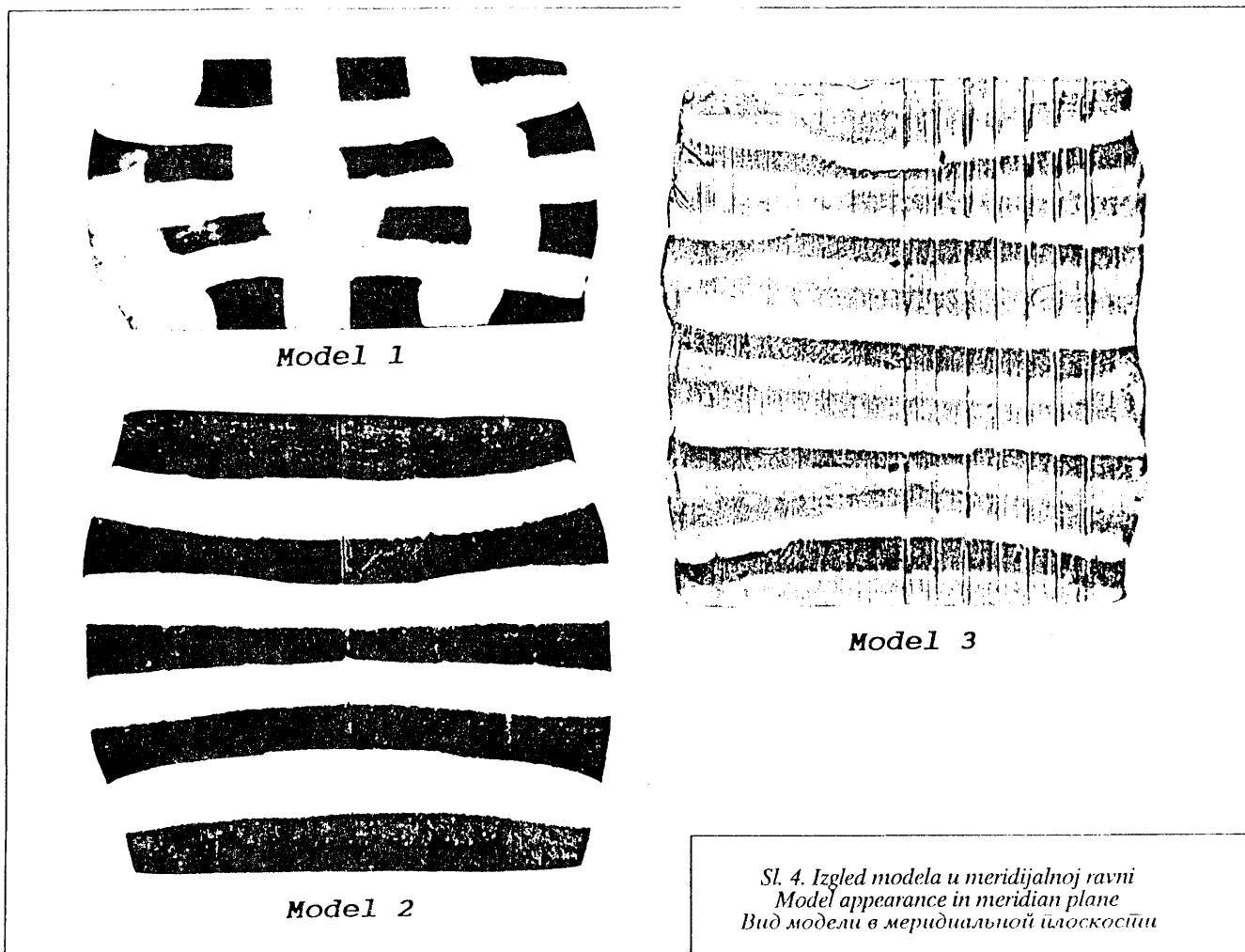
Modeli 1 i 2 u meridijalnoj ravni imaju koordinatnu mrežu a model 3 je višeslojni. Merenjem značajnih koordinata merne mreže na alatnom mikroskopu i upoređenjem tih koordinata sa početnim dobijeno je eksperimentalno polje pomeranja. Za model 3 primenjena je metodologija po Gubkinu [4] za analizu višeslojnih modela. Merenjem debljina slojeva na određenim mestima, podjednako udaljenim od ose simetrije, proračunava se položaj zamišljenih čvornih tačaka pretpostavljene koordinatne mreže. Kao i kod prethodnih modela, upoređenjem ovih koordinata sa početnim, dobija se polje pomeranja.

Za određivanje polja deformacije i efektivnog napona korišćen je softverski paket PAK, razvijen u Laboratoriji za inženjerski softver na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Rezultati proračuna dati su kao grafički prikazi distribucije efektivne deformacije, komponenta deformacije i efektivnog napona u deformisanoj konfiguraciji modela, koja odgovara eksperimentalnom polju pomeranja. U desnom delu prikaza data je legenda sa vrednostima koje odgovaraju svakoj izoliranoj na modelu. U donjem desnom uglu data je razmera prikaza.

4. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Modeli koji su sabijani su cilindričnog oblika, tako da se tokom deformisanja ostvaruje osnosimetrično deformaciono stanje. Kod korišćenih modela variran je odnos visine i prečnika, s obzirom da on utiče na broj i veličinu različitih deformacionih zona (v. sl.1). Pored toga, od pomenutog odnosa zavisi u kolikoj će se meri, pri određenom iznosu ostvarene ukupne deformacije, realizovati manje ili više homogeno deformisanje.

Kod modela 1, početni odnos visine i prečnika je $m=1.16$, a na kraju sabijanja pri ostvarenom $\delta=37.4\%$ vrednost odnosa $m=0.57$. Pri ovim vrednostima odnosa m u deformisanoj zapremeni pri osnosimetričnom defor-



Sl. 4. Izgled modela u meridijalnoj ravni
 Model appearance in meridian plane
 Вид модели в меридиальной плоскости

macionom stanju nastaju tri deformacione zone (v. sl.1). Prema slici 5, izohipsa 1, kojoj odgovaraju vrednosti $\epsilon_e=0.244-0.396$, pripada zoni oteznog deformisanja (zona 1 na slici 1). Deformaciona zona 3, na bočnoj površini, ima nešto veće vrednosti efektivne plastične deformacije, do 0.547 , dok su najveće deformacije ostvarene u zoni 2 (izohipse 4-10). Slična raspodela dobijena je i za efektivne napone ($\sigma_e=f(\epsilon_e)$).

Kod modela 2 sa početnim odnosom visine i prečnika $m=1.5$, u operaciji sabijanja je ostvarena ukupna relativna plastična deformacija $\delta=28.8\%$. Pri ovoj geometriji pripremljena, u deformacionoj zapremini se javljaju takode tri deformacione zone, pri čemu postoje dve zone sa izbočenom konturom na bočnoj površini (zone 3), kao što je prikazano na slici 1. Posmatrajući sliku 6 mogu se ovim zonama dodeliti sledeće oblasti vrednosti:

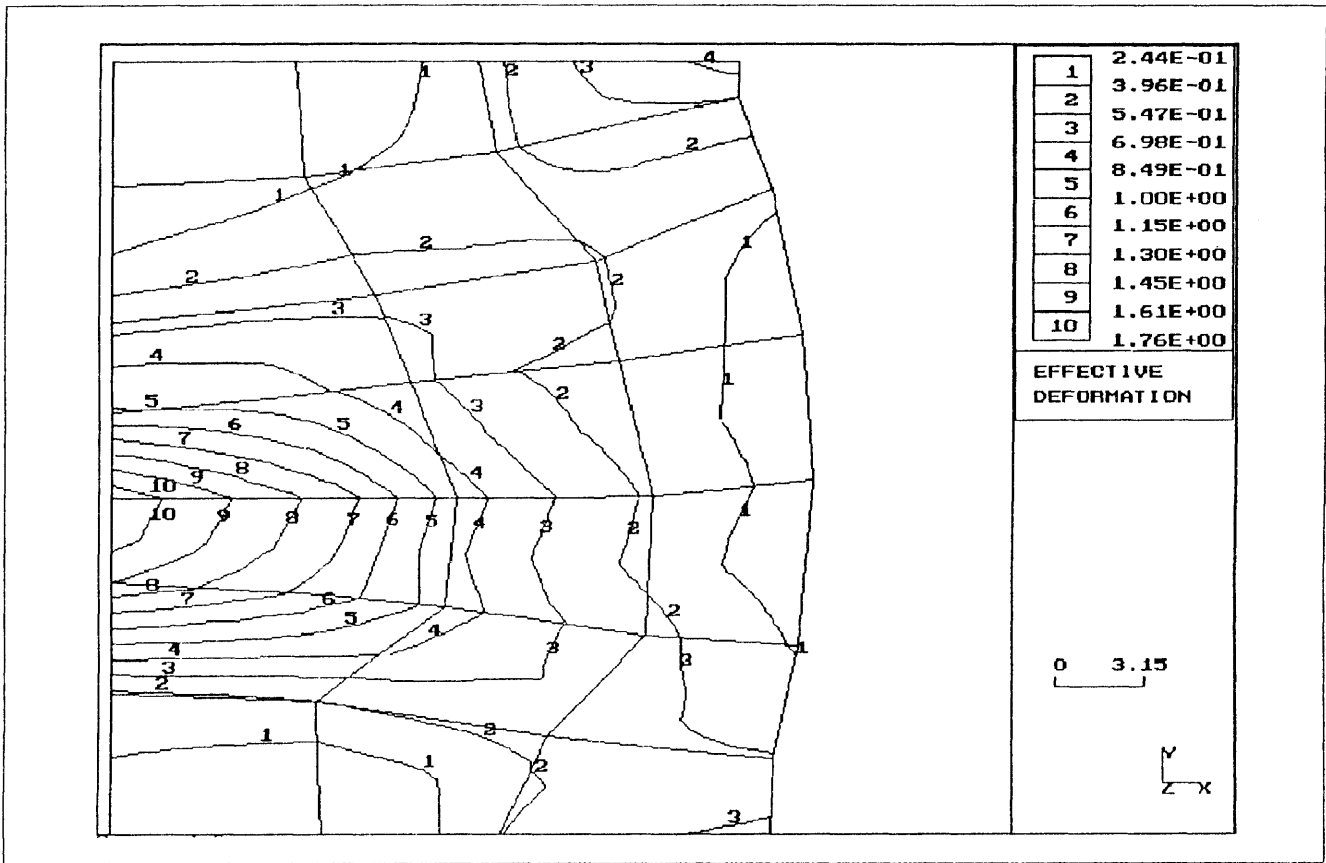
- ▶ zona 1 - izolinije 1, 2, 3, $\epsilon_e=0.047-0.216$;
- ▶ zona 2 - izolinije 4-10, $\epsilon_e=0.216-0.610$;
- ▶ zona 3 - izolinije 3, 4, 5, 6 $\epsilon_e=0.16-0.385$.

Model 3 izrađen je kao višeslojni, sa početnim odnosom visine i prečnika $m=2.3$. Pri sabijanju je ostvareno ukupno skraćivanje $\delta=36.5\%$. Početne mere modela, odnosno vrednost odnosa m , ukazuju na postojanje četiri deformacione zone u deformisanom modelu (v. sl.7):

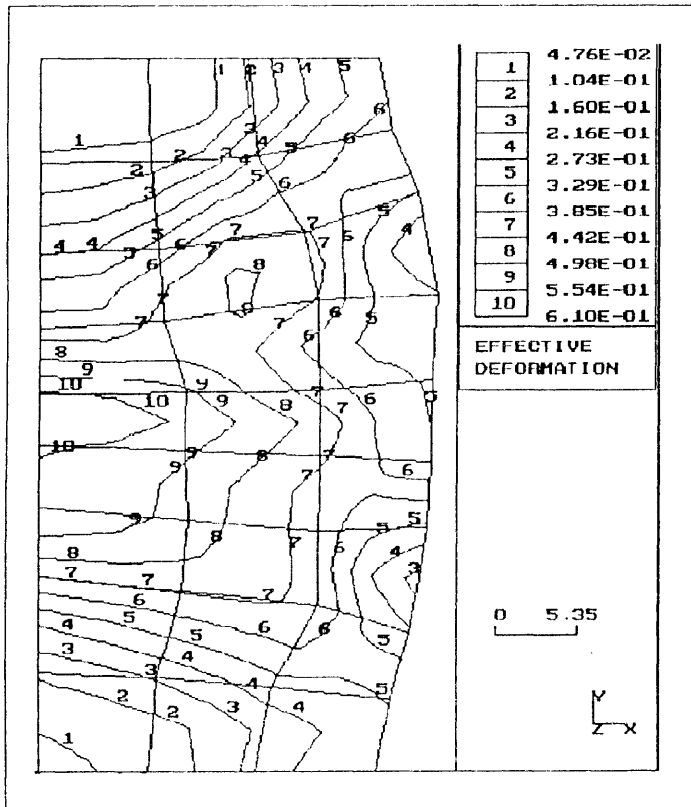
- ▶ zona 1 - izolinije 1-3, $\epsilon_e=0.0498-0.328$;
- ▶ zona 2 - izolinije 4-10, $\epsilon_e=0.328-0.976$;
- ▶ zona 3 - izolinije 4-7, $\epsilon_e=0.328-0.698$;
- ▶ zona 4 - izolinije 3-5, $\epsilon_e=0.235-0.513$;

Jasno je da se između odgovarajućih zona ne mogu povući oštre granice vrednosti. Kao što je prikazano na slici 1, zona 4 predstavlja središnju oblast deformisanog modela, u kojoj se javljaju nešto manje vrednosti deformacija. Osim toga, po razmaku pojedinih izolinija (3-4-5), može se zaključiti da je deformisanje u ovoj zoni najravnomernije. To nije slučaj kod modela 1 i 2. Posmatrajući oblik bočne linije modela u meridijalnoj ravni (v. sl. 7), uočavaju se dve ispupčene linije (zone 3) i između njih ravna linija (zona 4).

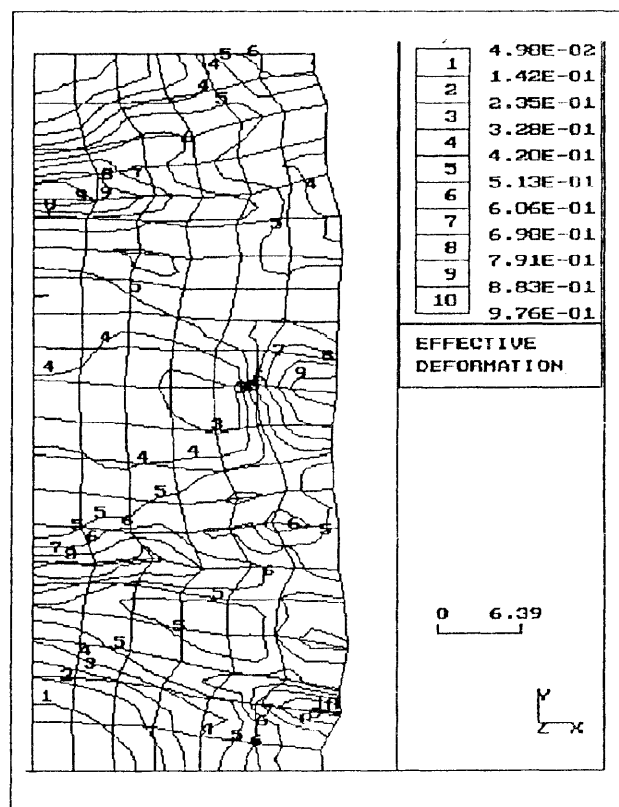
Operacija sabijanja najčešće prethodi operaciji kovanja ili istiskivanja, pa je veoma bitno za kvalitet finalnog proizvoda postići u ovoj operaciji što ravnomerniju raspodelu deformacija u deformisanoj zapremini. U tom cilju, preporučene vrednosti odnosa visine i prečnika kreću se u granicama $m=1.5-2.5$. Pripremi sa većim vrednostima m , od navedenih, nisu u primeni zbog mogućnosti pojave njihovog izvijanja.



Sl. 5. Izolinije efektivne plastične deformacije za model 1
 Iso - lines of effective elastic deformation for model 1
 Изолинии эффективной эластичной деформации для модели 1



Sl. 6. Izolinije efektivne plastične deformacije za model 2
 Iso - lines of effective elastic deformation for model 2
 Изолинии эффективной эластичной деформации для модели 2



Sl. 7. Izolinije efektivne plastične deformacije za model 3
 Iso - lines of effective elastic deformation for model 3
 Изолинии эффективной эластичной деформации для модели 3

5. ZAKLJUČAK

Fizičkim modeliranjem procesa tople obrade, uz primenu plastelina kao modelnog materijala, (metoda slojeva i metoda koordinatnih mreža), moguće je dobiti deformaciono polje u meridijalnoj ravni komada koji se sabija. Uticaj trenja u kontaktu materijala i alata zavisi od geometrije priprema - odnosa prečnika i visine; povećanjem ovog odnosa pojačava se i uticaj trenja na karakter deformisanja. Kod komada veće visine deformisanje je homogenije.

Smanjenje trenja na kontaktnim površinama i izbor odgovarajuće geometrije komada u fazi pripremnog sabijanja, omogućava dobijanje povoljne raspodele deformacija, odnosno efikasnije tečenje u završnim operacijama kovanja.

LITERATURA

- [1] П. И. ПОЛУХИН, **Технология процессов обработки металлов давлением**, "Металлургия" Москва, 1988.
- [2] K. LANGE, **Lehrbuch der Umformtechnik**, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1974.

- [3] K. CHIJIWA, Y. HATAMURA, N. HASEGAWA, **Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting**, Trans. ISIJ, 1981, 21(3), 178-186.
- [4] G. A. СМИРНОВ-АЛІАЙЕВ, В. П. ЧИКАДОВСКИЙ, **Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением**, Ленинград, "Машиностроение", 1972.
- [5] T. WANHEIM, C. FISCHLEIN, Y. YOSHIDA, **Strain Measurements in 3D- Simulation of Metal Forming Processes**, Annals of the CIRP, Vol. 35/1/1986, 165- 168.
- [6] M. STEFANOVIĆ, V. VASILJEVIĆ, **Fizičko modeliranje tople obrade - neka rešenja za 2D probleme**, Zbornik radova sa 24. Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, knjiga I, Novi Sad, 1992.
- [7] М. В. СТОРОЖЕВ, Е. А. ПОПОВ, **Теория обработки металлов давлением**, "Машиностроение", Москва 1977.

* Rad je izložen na Trećoj jugoslovenskoj konferenciji o tribologiji YUTRIB'93, Kragujevac, 24.-25. juna 1993. god.

Influence of Geometry and Contact Conditions in Hot Compression Modeling

In the paper is considered the influence of contact friction and geometry of the working piece in conventional hot compression. Existence of friction in contact between tool and material leads to uneven deformation and appearance of inhomogeneous deformation field in the deformed volume. Distribution of specific pressures over the contact area is not even and it is significantly dependent upon the geometry and tribo conditions in contact. In the paper are presented results of physical modeling of the hot compression process, by application of multi-colored plasticine as the modeling material. The basic indicator is the deformation field in the main cross sections of the working piece.

Воздействие геометрии и условий контакта при моделировании горячей осадки

В работе рассматривается значение коэффициента трения и геометрии заготовки при стандартной горячей осадке. Существование трения в контакте инструмента и заготовки обуславливает неравномерное деформирование и образование разнородного поля деформации в деформируемом объеме. Распределение удельных давлений по поверхности контактирования является неравномерным и в большой мере определяется геометрией и трением в контакте. Авторами приводятся результаты физического моделирования процесса горячей осадки при использовании разноцветного пластилина, служащего моделируемым материалом.