

MODELIRANJE PROCESA ISTOSMERNOG ISTISKIVANJA U HLADNOM STANJU ZA ANALIZU METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Dr Miroslav TRAJANOVIĆ, Aleksandar PANTOVIĆ

Dr Miroslav Trajanović, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu, radi od 1978. na katedri za proizvodno mašinstvo istraživanja vezana za modeliranje i optimizaciju proizvodnih sistema i primenu informacionih tehnologija u mašinstvu. Do sada je objavio preko 80 naučnih radova i učestvovao u 15 naučno istraživačkih projekata. Pored toga, bio je rukovodilac 3 naučno istraživačka projekta i više razvojnih projekata za potrebe privrede. Trenutno obavlja funkciju direktora Informacionog sistema Mašinskog fakulteta u Nišu.



Aleksandar Pantović, dipl. inž. maš., rođen je 24. VII 1977. godine u Leskovcu. Završio je Mašinski fakultet u Nišu 2002. godine, na smeru za proizvodno mašinstvo. Poslediplomske studije na smeru za proizvodno mašinstvo upisuje školske 2001/02. god. u Nišu. Saradnik je na jednom od naučno-istraživačkih projekata Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj. Koautor je dva stručna rada.



Kategorija rada: ORIGINALAN NAUČNI RAD
Recenzent: dr Velibor MARINKOVIĆ
UDK/UDC: 621.983.4.001.57
Rad primljen: 16. 05. 2003.

ADRESA:
18000 Niš
Mašinski fakultet
A. Medvedeva 14
www.masfak.ni.ac.yu

1. UVOD

U savremenoj metalnoj industriji obrada materijala plastičnim deformisanjem zauzima značajno mesto.

Fundamentalna naučna disciplina, na kojoj je bazirana ova tehnološka disciplina je matematička teorija plastičnosti, a posebno njen primenjeni deo – teorija plastične deformacije.

Matematička pozadina postupaka obrade materijala plastičnim deformisanjem omogućila je analizu ovakvih problema primenom računara. Ovakav način analize problema omogućava dobijanja podataka o procesu bez izrade alata i vršenja eksperimenata. Pri tome se dobijaju vrednosti koje se mogu očekivati u realnim uslovima obrade.

U ovom radu vršena je simulacija procesa istosmernog istiskivanja šupljeg komada u hladnom stanju metodom konačnih elemenata (MKE). Ciljevi analize su postavljanje modela koji će omogućiti simulaciju pomenutog procesa deformisanja i potvrda pogodnosti upotrebe metode konačnih elemenata za njegovo rešavanje, odnosno poređenje rezultata MKE analize sa rezultatima dobijenim eksperimentalnim putem [1].

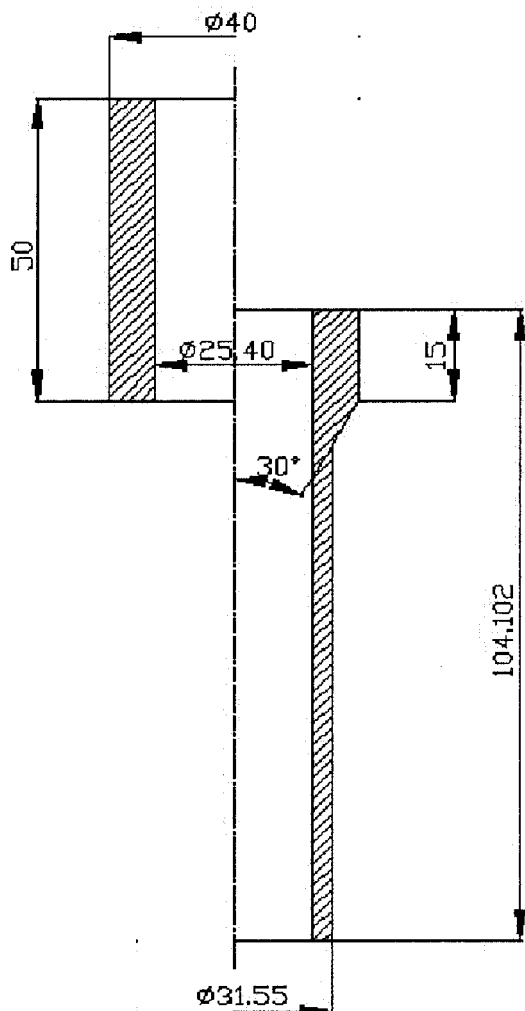
U toku modeliranja posmatranog procesa izvršene su određene aproksimacije, koje u određenoj meri utiču na rezultate analize.

2. KARAKTERISTIKE PROCESA ISTOSMERNOG ISTISKIVANJA U HLADNOM STANJU

2.1. Opis obratka

Pripremak koji je korišćen pri modeliranju i analizi je prstenastog poprečnog preseka sa dimenzijama kao na slici 1.

Materijal priprema je **Muk 7** (trgovački naziv). Ovaj materijal nema oznaku po JUS-u, a oznaka po DIN-u je UQSt36-2. Ovo je niskougljenični čelik koji se odlikuje velikom plastičnošću, tj. dozvoljava da se pri deformisanju postignu veliki stepeni deformacije. Pripremak se izrađuje sa odgovarajućim dimenzijama, a zatim se termički obrađuje. Termička obrada (meko žarenje) se obavlja na temperaturi od oko 973 K, sa vremenom držanja do 3 časa. Potom se vrši hlađenje materijala u peći. Podaci o materijalu, eksperimentalnim vrednostima parametara procesa kao i podaci o alatu i mašini na kojoj su obavljena ispitivanja preuzeti su iz literature [1].



Slika 1. Izgled priprema i izratka sa dimenzijama

2.2. Opis postupka i alata

Prije p obrade materijala istiskivanjem sastoji se u tome da se materijal, usled dejstva visokog pritiska dovodi u stanje plastičnog tečenja. Pri tome se materijal istiskuje kroz otvor u matrici [1].

Vitalni delovi alata, tiskač i matrica, konstruisani su prema uobičajenim preporukama, važećim u praksi. Ovi delovi su od legiranih čelika, termički su obrađeni, brušeni i polirani. Od istih materijala su izrađeni i trn i kontejner. Kontejner i matrica su armirani sa dva stezna prstena. U tako presovanom sklopu stvara se povoljna raspodela napona u matrici i kontejneru u toku procesa deformisanja. Konus matrice je pod uglom od 60°. Tiskač je izrađen sa spoljašnjim prečnikom $D_0=40\text{mm}$. Na slici 2. prikazana je matrica za dobijanje željenog dela.

Nakon postavljanja priprema u alat, tiskač se kreće naniže do trenutka kontakta sa pripremkom. Zatim se, pod dejstvom tiskača, materijal prvo elastično a zatim i plastično deformiše, popunjavajući zatore koji postoje izmedju njega i matrice i njega i trna. Istovremeno se popunjava i konus matrice. Eksperimentalna istraživanja su pokazala da materijal popuni zatore približno kada popuni i konus. Zazori izmedju matrice i priprema i trna i priprema postoje radi lakšeg postavljanja priprema u matricu i kontejner, odnosno, lakšeg prolaska trna kroz pripremak u praznom hodu. Zazor izmedju priprema i matrice je 0,2 mm po prečniku, a izmedju priprema i trna je 0,3 mm. Hod tiskača nakon kontakta sa pripremkom je 35 mm. U donjem delu alata nalazi se izbacivač u obliku cilindričnog tela sa obodom. Nakon izvršenog postupka deformisanja izbacivač izbacuje izradak.

Zbog visokih radnih pritisaka podmazivanju se u ovom procesu deformisanja poklanja velika pažnja. U tom smislu pokazalo se veoma efikasnim nanošenje sloja, u vidu prevlaka, koja ima zadatak da spreči istiskivanje maziva na početku procesa i omogućuje podmazivanje do završetka procesa.

Za podmazivanje je ovde korišćena fosfatna prevlaka. Fosfatne prevlake veoma su porozne pa zadržavaju mazivo, ne otiru se sa površina priprema a služe i kao zaštita od korozije. Kombinacijom fosfatnih prevlaka i odredjenih maziva dobija se visoki kvalitet površina komada a sile trenja svode se na minimum. U posmatranom postupku trenje izmedju tarućih površina je $\mu=0,06$.

Očekivana maksimalna sila za opit je bila 1000 kN a za smeštaj eksperimentalnog alata i nesmetano izbacivanje gotovih komada bilo je neophodno da presa poseduje radni prostor od 600 mm.

Iz ovih razloga korišćena je hidraulička presa nazivne sile od 1000 kN. Brzina pritiskivača u praznom hodu ove prese iznosila je 400 mm/s, a u radnom hodu 10 do 15 mm/s.

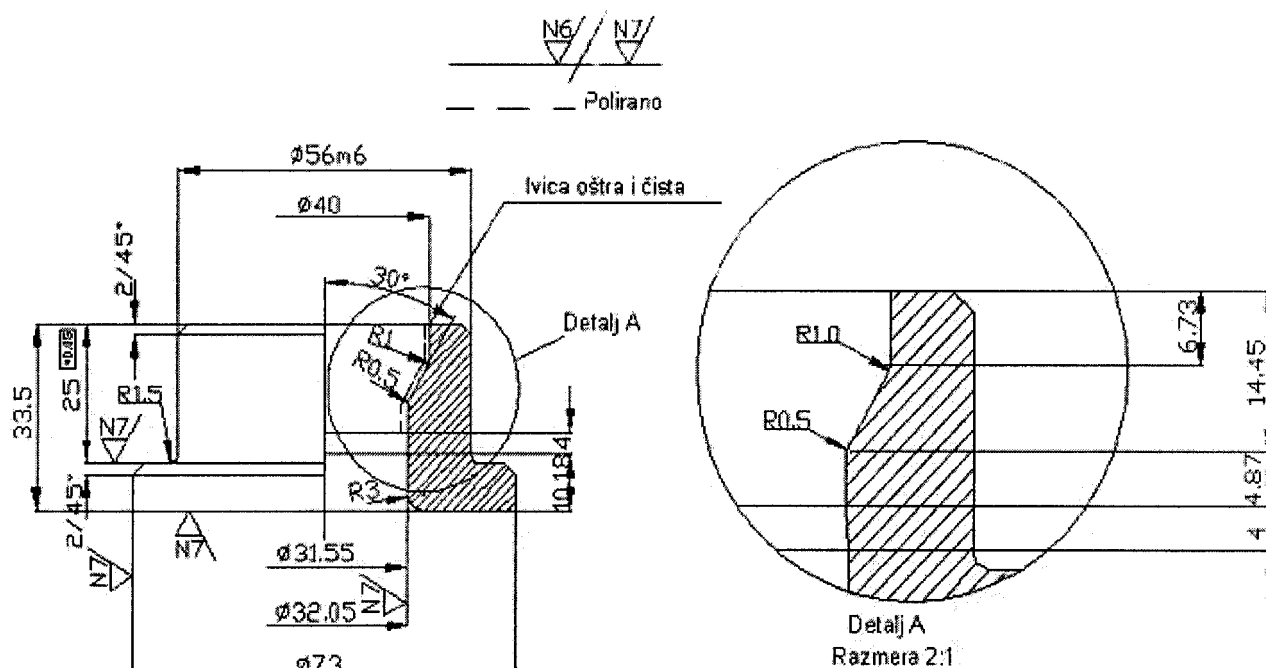
3. MODEL PROCESA ISTOSMERNOG ISTISKIVANJA U HLADNOM STANJU ZA MKE ANALIZU

3.1. Idealizacija

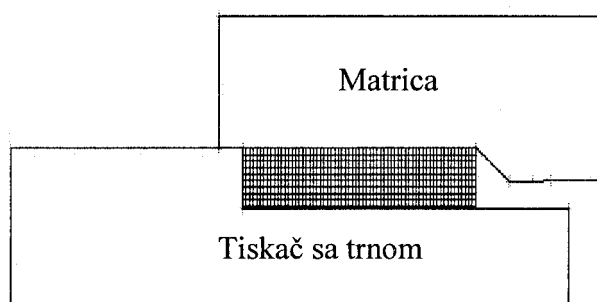
Na osnovu raspoloživih podataka o karakteristikama, obliku i dimenzijama priprema i

alata, pristupa se prvo kreiranju geometrijskog modela elemenata koji učestuju u proces istiskivanja. Zbog postojanja simetrije opterećenja i geometrije za ravni koje prolaze kroz osu priprema (osnosimetrični problem), model je redukovao na polovinu preseka koji prolazi upravo kroz osu priprema (slika 3.).

Za analizu je pretpostavljeno da su trn, tiskač i matrica apsolutno kruta tela. Zbog toga su prilikom izrade modela korišćena dva tipa kontaktnih tela: deformabilna i kruta tela.



Slika 2. Matrica sa dimenzijama



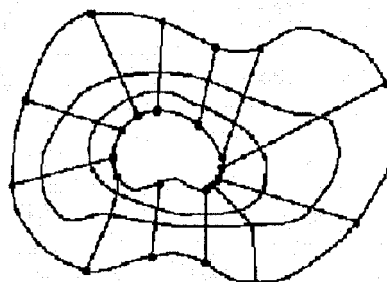
Slika 3. Prikaz modela za analizu metodom konačnih elemenata

Deformabilna tela se u analizi posmatraju kao skupovi konačnih elemenata kao što je prikazano na slici 4.

Deformabilno telo ima tri ključne odlike:

1. Elemente koji čine telo.

2. Čvorove na spoljašnjim površinama koje mogu stupiti u kontakt sa drugim telima ili telom kome pripadaju (kontakt tela samog sa sobom). Ovi čvorovi se posmatraju kao potencijalni kontaktni čvorovi, tj. kontaktne tačke



Slika 4. Deformabilno telo

3. Ivice (2D) ili stranice (3D) koje opisuju spoljnu površinu, a koja može doći u kontakt sa čvornim tačkama drugog tela (ili u kontakt sa sobom). Ove ivice/stranice se posmatraju kao potencijalni kontaktni segmenti.

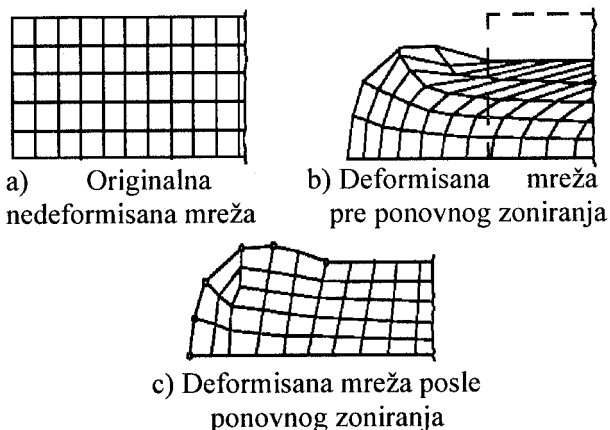
Na ovaj način se dobija model u obliku mreže konačnih elementata.

Kruta kontaktna tela su sastavljena od krivih (2D) ili površina (3D) ili mreža sačinjenih samo od termičkih elemenata, u problemima spregnutih polja. Najvažnija činjenica kod krutih tela je da se ona ne izobličuju.

Deformabilna tela mogu biti u kontaktu sa krutim telima, ali kontakt između krutih tela nije moguć.

Površinama krutih kao i deformabilnih tela mogu se dodeliti osobine tarućih površina. S obzirom da se razmatra problem u kome trenje ima veliki uticaj na krajnje rezultate, trenje je ovde posebno razmatrano. Korišćen je Coulomb-ov model trenja.

U simulacijama proizvodnih procesa, cilj je da se primerak deformiše od nekog početnog oblika do konačnog, često složenog oblika. Ovakva deformacija materijala rezultuje izobličenjem mreže konačnih elemenata. Iz ovog razloga, često je potrebna primena koraka ponovnog zoniranja i izrade mreže ("rezoning" / "remeshing"). Tada se analiza prekida. Kreira se nova mreža; trenutno stanje deformacije, stepena deformacije, napona itd., se prenosi na novu mrežu, i analiza se nastavlja.



Slika 5. Primer ponovnog zoniranja i ponovne izrade mreže u toku analize

3.2. Pridruživanje pomeranja i graničnih uslova

Pomeranje (istiskivanje) materijala je zadato preko pomeranja tiskača sa trnom. Ovo pomeranje se prenosi preko kontaktne površine, sa tiskača, na materijal koji se istiskuje. Zadato pomeranje tiskača

je 35mm. Pri tome je korišćena procedura direktnih ograničenja. U ovoj proceduri, prate se kretanja tela, da bi se u trenutku kontakta kretanje ograničilo postavljenim graničnim uslovima. Ovde su granični uslovi, koji predstavljaju ograničenja kretanju materijala (deformabilnog tela), zadati kreiranjem linija koje se odnose na delove alata, tj. matricu, tiskač, trn i kontejner. Svi delovi alata se u analizi posmatraju kao kruta tela. Međutim, u stvarnosti su ona deformabilna tako da se ovde vrši određena aproksimacija. Ova procedura može biti veoma tačna ako program može da odredi, kada dolazi do kontakta.

Pošto je usvojeno da je brzina pomeranje tiskača u toku deformisanja 10 mm/s, a pomeranje tiskača od trenutka dodira sa materijalom 35 mm, definisano je vreme istiskivanja od 3,5 sekundi. Kako program analizu vrši iterativno, definisan je i broj inkremenata u okviru koga se analiza mora izvršiti. U okviru svakog inkrementa pomeranje tiskača je jednako.

S obzirom da se pri deformisanju ostvaruju velike sile i da se obrada obavlja u hladnom stanju, prilikom kreiranja modela zanemaren je uticaj promene temperature deformisanja na rezultate analize.

3.3. Model materijala

Materijal priprema koji se koristi u posmatranom postupku je niskougljenični čelik sa trgovačkom oznakom **Muk 7**. Njegovo ponašanje u oblasti plastičnosti dato je krivom ojačavanja koja je dobijena eksperimentalim putem [1]:

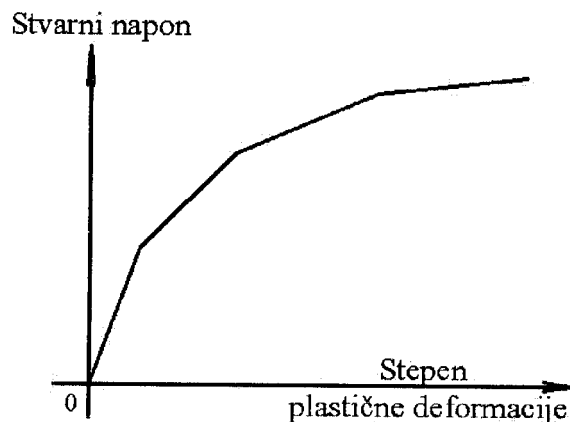
$$K = 541,81 \varphi^{0,19} \quad [\text{N/mm}^2]$$

gde su: K - stvarni napon tečenja, φ - logaritamski stepen deformacije.

Za opisivanje ponašanja materijala u oblasti plastičnosti korišćen je von Mises-ov kriterijum. Ovaj kriterijum ima najširu primenu u MKE analizama plastičnog deformisanja metala [2]. Svoju popularnost duguje kontinualnoj prirodi funkcije kojom je definisan, kao i slaganju sa zapaženim ponašanjem najčešće korišćenih obradivih materijala. Prema von Mises-ovom kriterijumu tečenje nastupa kada se efektivni (ili ekvivalentni) napon izjednači sa naponom tečenja izmerenim pri vršenju jednoosnog testa [3].

U toku pripreme analize materijal je u oblasti plastičnosti opisan zadavanjem parova tačaka stvarni napon-logaritamski stepen plastične deformacije. Na ovaj način se stvarna kriva aproksimira pravolinijskim segmentima kao na slici 6.

Pored toga za predstavljanje materijala iskorišćen je i izotropni model ojačavanja [2]. U procesu pripreme analize korišćani su i sledeći podaci za materijal: modul elastičnosti $E=210000 \text{ N/mm}^2$, napon na granici tečenja $R_{p,0.2}=290.2 \text{ N/mm}^2$, Poisson-ov koeficijent $\nu=0.3$.



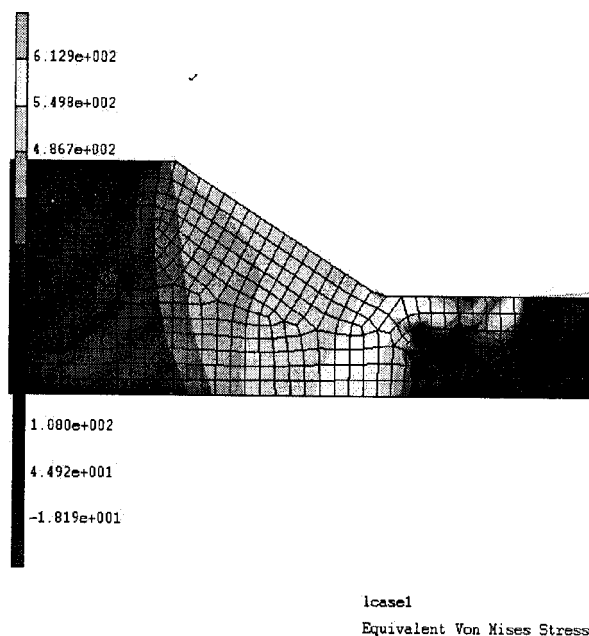
Slika 6. Aproksimacija krive stvarni napon-stepen plastične deformacije pravolinijskim segmentima

Sve navedene aproksimacije i uprošćenja, treba uzeti u obzir prilikom razmatranja rezultata analize.

4. REZULTATI ANALIZE

Saglasno postavljenim ciljevima analize, posmatračemo naponsko-deformaciono stanje u materijalu i promenu sile na tiskaču u odnosu na vreme i u odnosu na promenu hoda tiskača.

Na slici 7. je prikazana raspodela von-Mises-ovog napona u materijalu na završetku procesa deformisanja. Ovde je data raspodela napona u žarištu deformacije. Može se zaključiti da napon u materijalu znatnije raste od poprečnog preseka koji odgovara ulasku ka poprečnom preseku koji odgovara izlasku materijala iz konusa. Pri tome se najveći naponi u materijalu javljaju na mestu završetka konusnog dela matrice kao i na mestu završetka prstena za kalibrisanje. S druge strane, veliki napon se javlja i na mestu kontakta materijala sa trnom a nasuprot tački završetka konusa.

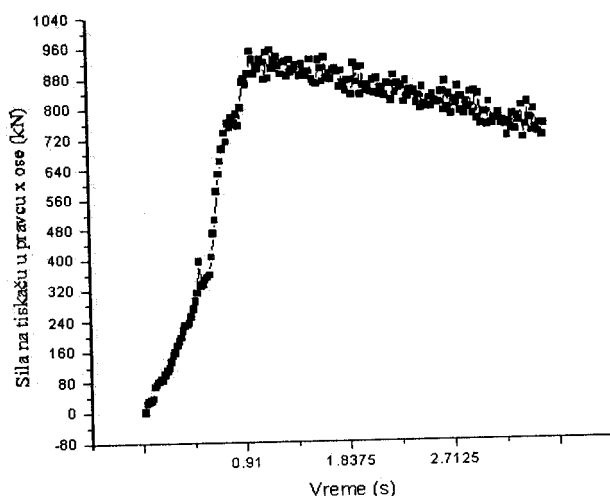


Slika 7. Raspodela von-Mises-ovog napona u žarištu deformacije

Pored napona, jedna od posmatranih izlaznih veličina je i promena sile na tiskaču. Način promene ove sile zavisno od vremena, odnosno hoda tiskača dat je na slikama 8. i 9.

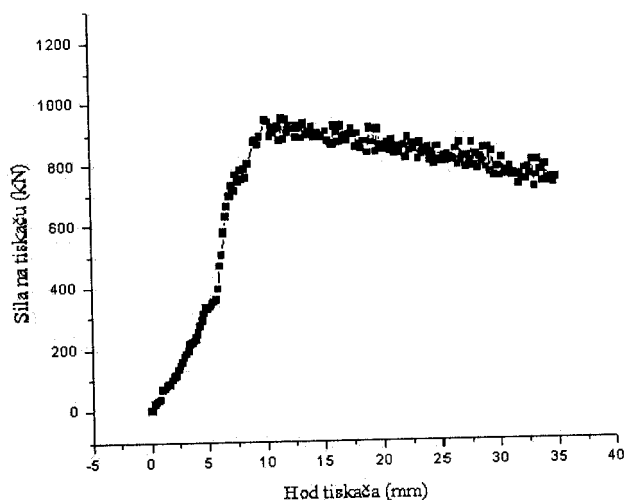
Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da je maksimalna sila na tiskaču 872,5 kN. Na osnovu rezultata MKE analize zapaža se da se vrednost maksimalne sile ostvaruje u oblasti oko 58-og inkrementa, tj. u trenutku kada materijal počne da izlazi iz matrice (odnosno iz prstena za kalibrisanje). Pri tome se sa slika dobija da je vrednost maksimalne sile 951,35 kN, što u odnosu na silu dobijenu eksperimentalnim putem predstavlja grešku od 9,1%.

Na slici 10. prikazana je raspodela Von-Mises-ovog napona u trenutku kada se ostvaruje najveća sila na tiskaču. Interesantno je reći da se u ovom trenutku postiže maksimalni napon. Ovaj maksimalni napon se postiže na mestu dodira materijala sa prstenom za kalibraciju. Analizom dobijenih rezultata zapaža se da nakon izlaska vrha obratka iz matrice napon u već deformisanom materijalu opada. Takođe se postiže i ravnomernija raspodela napona po poprečnom preseku obratka. Takva raspodela napona zadržava se u materijalu do trenutka završetka procesa.



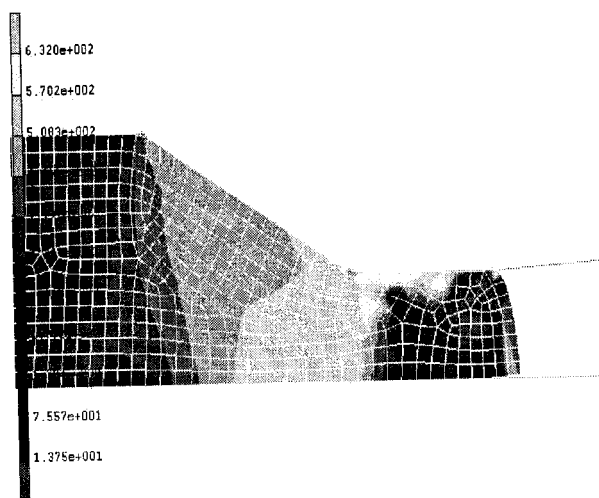
Slika 8. Način promene sile na tiskaču po vremenu sa uklonjenim ekstremnim vrednostima

Na slici 11. data je raspodela ekvivalentne logaritamske plastične deformacije u materijalu nakon završetka procesa istiskivanja. Zapaža se da se najveća deformacija ostvaruje na mestu izlaska materijala iz konusa matrice, a da je nakon toga njena vrednost po poprečnom preseku konstantna. To je i očekivano s obzirom da se posmatra raspodela plastične deformacije. Naime, nakon izlaska materijala iz matrice u njemu trajno ostaju plastične deformacije.

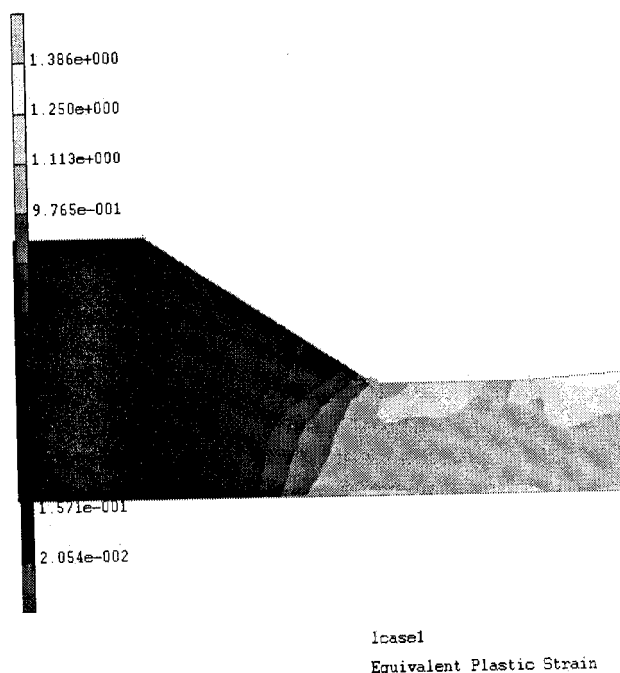


Slika 9. Način promene sile na tiskaču, u pravcu kretanja tiskača, po hodu tiskača sa uklonjenim ekstremnim vrednostima

Ako se pak posmatra raspodela ukupne deformacije, onda se zapaža da deformacija neznatno opada nakon izlaska materijala iz matrice. To je posledica nestanka elastičnih deformacija iz materijala.



Slika 10. Raspodela von-Mises-ovog napona u trenutku kada se postiže najveća sila na tiskaču



Slika 11. Prikaz raspodele ekvivalentne logaritamske plastične deformacije u materijalu nakon završetka procesa istiskivanja.

Takođe se može primetiti da se po spoljašnjem obodu istisnutog materijala javlja određeni porast stepena deformacije, a to je posledica prolazak materijala kroz prsten za kalibraciju.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza procesa istosmernog istiskivanja šupljeg komada, primenom metode konačnih elemenata (MKE).

Rezultate analize treba uzeti sa određenom rezervom, jer pojedini parametri geometrije i procesa nisu uzeti u obzir. Takođe, u programu se koriste određene teorijske pretpostavke koje su uobičajne u praksi, a koje približno opisuju mehanizme deformisanja, tako da i zbog toga treba očekivati određeno odstupanje dobijenih rezultata od rezultata dobijenih eksperimentom.

Naponsko-deformaciono stanje, koje nastaje u materijalu, u stvarnosti je analitičkim metodama vrlo teško odrediti. S druge strane, MKE predstavlja efikasno sredstvo za rešavanje problema ove vrste. S obzirom da je MKE numerička metoda, dobijene rezultate treba uzeti s određenom rezervom jer na tačnost rezultata znatno utiče i stručno znanje analitičara.

Zaključak ove analize je da se metoda konačnih elemenata i program koji je korišćen u radu, mogu efikasno koristiti za rešavanje posmatranog problema.

LITERATURA

- [1] V. Marinković, Istraživanje tečenja materijala u procesima zapreminskog (masivnog) deformisanja u hladnom stanju, Doktorska disertacija, Niš, 1982.
- [2] M. Kojić, Computational procedures in inelastic analysis of solids and structures, Center for Scientific Research of Serbian Academy of Sciences and Arts and University of Kragujevac, Kragujevac, 1997.
- [3] V. Marinković, Deformaciono ojačanje materijala u procesima obrade deformisanjem u hladnom i toplom stanju, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš, 1995.
- [4] Materijal za vežbanja iz predmeta "Modeliranje i optimizacija proizvodnih sistema primenom računara", Mašinski fakultet, Niš, 2002.

REZIME: Tema ovog rada je opisivanje primene metode konačnih elemenata na proces istosmernog istiskivanja. Analiza je pokazala da se primenom metode konačnih elemenata sa dovoljnom tačnošću mogu dobiti posmatrani parametri procesa. Odstupanje rezultata MKE analize od rezultata dobijenih eksperimentalnim putem posledica je korišćenih numeričkih metoda, kao i aproksimacije pojedinih parametara geometrije i procesa u toku faze pripreme analize.

Ključne reči: Modeliranje, Metoda konačnih elemenata, Trenje, Ojačavanje materijala, Sila

MODELING OF COLD FORWARD EXTRUSION PROCESS FOR FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS

Summary: This paper is dealing with application of finite element method for cold forward extrusion process simulation. Comparison of FEM results with experimental ones shows good accuracy of applied process model. Some differences are due to nature of finite element method and applied geometry and process approximations.

Keywords: Finite Element Method, Modeling, Friction, Workhardening, Force

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

РЕЗЮМЕ: В этой работе описывается применение метода конечных элементов на процессе прямого выдавливания. Анализ показывает что применением метода конечных элементов можно получить параметры рассматриваемого процесса. Оdstупление результатов МКЕ анализа от результатов полученных экспериментом, обусловлено последствием вычислительных методов и аппроксимацией отдельных параметров геометрии и процесса в ходе приготовления анализа.

Ключевые слова: Метод конечных элементов, Моделирование, Трение, Упрочнение материала, Сила