

Računalniško simuliranje postopka kovanja

Computer Simulation of Forging Process

Janez Stupan - Iztok Potrč

V prispevku je obravnavano tridimenzionalno računalniško simuliranje procesa kovanja z računalniškim programom MSC/SuperForge. Kovanje je izrazit proces tridimenzionalne deformacije, med katerim se stalno spreminjajo robni pogoji. Začetna oblika je v večini primerov preprosta, končna oblika pa je lahko zelo zahtevna in se doseže s preoblikovanjem v več stopnjah.

Rezultati simuliranja so; deformirana oblika, temperaturno polje, polje toka materiala, tlaka, dejanske napetosti, dejanskih plastičnih deformacij itn.

© 2000 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: kovanje, deformacije, metode končnih volumnov, tečenje materialov)

This paper deals with three dimensional simulation of forging process performed by the computer code MSC/SuperForge. The process of forging is, by nature, a highly nonlinear and transient process, typically characterized by large 3-D material deformation and continuously changing boundary condition. In most cases the initial billet shape is relatively simple, but final shape of the end product is often geometrically complex, to the extent that it is commonly achieved by employing multiple forming stages.

The results of an analysis is deformed shape, temperature, pressure, effective plastic strain, effective stress, etc.

© 2000 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: forging, deformation, finite volume method, material flow)

0UVOD

Sedanje stanje analiziranja vzrokov loma utopnega orodja, tečenja materiala in obrabe orodja temelji na praktičnih izkušnjah posameznega tehnologa.

V prispevku je prikazan alternativni postopek analiziranja procesa kovanja z uporabo numeričnega programskega orodja MSC/SuperForge.

Današnje stanje matematičnega in numeričnega modeliranja omogoča v povezavi z zmogljivimi računalniki reševanje takšnih problemov.

Prednost računalniškega simuliranja je prav v tem, da se pri simuliranju ne zgodi fizična porušitev modela in se lahko ta uporabi kolikorkrat želimo. Glede na dejstvo, da je kovanje postopek preoblikovanja z veliko tridimenzionalno materialno deformacijo, ki ga spremljajo spreminjajoči se robni pogoji, je analitično reševanje teh primerov omejeno na nekaj preprostih oblik. Dandanes pa kupci odkovkov zahtevajo vedno zapletenejše oblike.

Tako je v prispevku prikazano načelo računalniškega simuliranja ter posamezni rezultati omenjenega simuliranja. Kovanje v toplem je postopek preoblikovanja jekla pri temperaturi nad 1200°C.

Temperatura v gravuri lahko lokalno zelo niha, in sicer zaradi tlakov v gravuri in zaradi toka materiala. Kakor je znano, jeklo v temperaturnem območju kovanja močno spreminja svoje lastnosti, hkrati pa je kovanje izrazit primer velike plastične deformacije.

Simuliranje kovanja je matematično zasnovan numerični postopek, ki z uporabo računalnika izračuna in prikaže proces preoblikovanja materiala pri kovanju.

Računalniško simuliranje omogoča, da:

- lahko dejanski proces kovanja teoretično preskusimo in optimiramo na podlagi CAD računalniškega modela prve in končne faze utopnega orodja na računalniku že v fazi, preden se izdelata utopno orodje,
- za velikoserijske izdelke izvedemo optimiranje oblike gravur in s tem bistveno vplivamo na zmanjšanje problemov in stroškov v proizvodnem procesu.

1 NUMERIČNA METODOLOGIJA

Metoda končnih elementov (MKE) je numerični način reševanja problemov, ki se je v

zadnjih 20 letih razvila v standardno metodo obravnavanja zapletenih nalog elastoplasto-mehanike. Znanih je že več različic metode končnih elementov in metode robnih elementov. V zadnjem času se na področju preoblikovanja vse bolj uveljavlja tudi metoda končnih prostornin.

Osnovne enačbe, ki se rešujejo pri numerični analizi, so:

- enačba ravnotežja:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

- kriterij tečenja:

$$f(\sigma_{ij}) = C \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} (\sigma_{ij}' \sigma_{ij}')^{1/2} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) \quad (3)$$

- konstitutivna enačba:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma_{ij}' \quad (4)$$

- kompatibilnostna enačba:

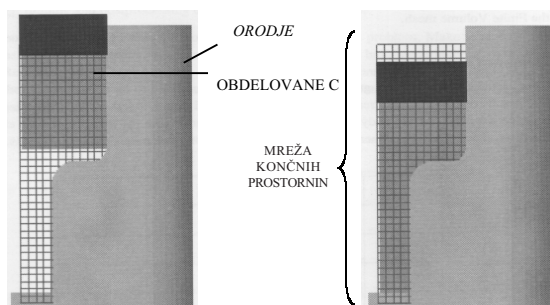
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

1.1 Metoda končnih prostornin (MKV)

Pri metodi končnih prostornin je mreža točk utrjena na določenem mestu v prostoru. Elementi so med seboj povezani s točkami in so del prostora. Material pri analizi preprosto teče skozi mrežo končnih prostornin, masa, moment in energija pa se prenašajo iz enega elementa v drugega. Tako programski paket, ki deluje na načelu metode končnih prostornin, preračunava gibanje materiala skozi element konstantne prostornine.

Pri analizi procesa kovanja deluje orodje kot robni pogoj za tečenje materiala skozi mrežo končnih prostornin.

Vedeti je treba, da moramo pri modeliranju procesa kovanja z metodo končnih prostornin posebno pozornost posvečati samemu modeliranju.



Sl. 1. Osnovni elementi, potrebni za numerično simuliranje

Posebej je treba upoštevati, da se način modeliranja po metodi končnih prostornin močno razlikuje od modeliranja po metodi končnih elementov.

Najpomembnejši vidik modeliranja po metodi končnih prostornin je ta, da se izdelata dovolj velika mreža, tako da material po končani analizi ni zapustil mreže. V primeru, ko mreža ni dovolj velika, se analiza samodejno konča in je takšna analiza vedno napačna.

2 PROCES KOVANJA

Obdelava materiala z deformacijo ima v osnovi dva cilja:

- spremembo začetne oblike v končno obliko,
- spremembo lastnosti materiala.

Pri samem postopku obdelave to pomeni upoštevati tako teorijo plastičnosti, metalurgijo kakor tudi samo proizvodnjo. Kovanje je postopek obdelave z deformiranjem in proučuje odpor materiala ter določa preoblikovalno delo za potek deformiranja, da bi izbrali tako ustrezni stroj kakor tudi obnašanje in dimenzioniranje orodja za omenjeni postopek.

Poleg odpora materiala proti deformaciji se analizirajo tudi termomehanski vplivi, ki omogočajo najboljšo spremembo začetne oblike obdelovanca v končno obliko. Poznavanje termomehanskih razmer pri deformaciji je nujno potrebno za določanje optimalnih režimov tehnološkega postopka. Stanje materiala pred deformacijo in tudi po njej je zelo pomemben parameter v postopku. Poleg kemijske sestave imajo pred začetkom deformacije pomembno vlogo tudi mehanske lastnosti materiala, kristalna struktura, kakovost površine obdelovanca pred deformacijo itn.

Kovanje ima dve značilnosti:

- obdelovanci so izpostavljeni veliki plastični deformaciji, kar se kaže v precejšnji spremembi oblike in prerezov,
- obdelovanec se močno trajno (plastično) deformira, tako da se elastično okrevanje zanemari.

V tehniki kovanja je pomembna pravilna oblika orodja poleg drugih stvari, kot so definiranje deformacijskih mehanizmov postopka. Brez



Sl. 2. Oblika elementa končne prostornine

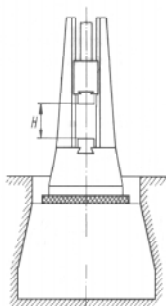
poznavanja vplivov stičnih pogojev, lastnosti materiala in oblike obdelovanca na mehanizem postopka ni mogoče pravilno oblikovati oblike orodja, da bi preprečili mogoče napake. Zato je treba največjo pozornost posvečati modeliranju postopka za računalniškimi simuliranjem. V preteklosti se je razvilo precej metod za simuliranje posameznih preoblikovalnih postopkov.

Pri postopku preoblikovanja se začetna oblika obdelovanca spremeni v želeno obliko oziroma končno obliko. Tečenje materiala, stik med odkovkom in orodjem, nastajanje toplote in prenos toplote med plastičnim tečenjem, razmerje med mikrostrukturo/lastnostmi in parametri postopka je težko napovedati in analizirati. Običajno je treba izvajati preoblikovanje v več stopnjah, tako da je mogoč prehod iz preproste začetne oblike obdelovanca v končno, veliko bolj zahtevno obliko. V posameznih primerih se uporablja tudi predpreoblikovanje, kar pomeni, da se obdelovanec predhodno preoblikuje tako, da se na predpisanem mestu zagotovi ustrezna prostornina materiala.

Postopek kovanja vključuje vse parametre: obdelovanca (geometrijsko obliko, material) izdelavo orodja (geometrijsko obliko, material), stične pogoje obdelovanec - orodje, mehanizme plastične deformacije, uporabljeno opremo, karakteristike končnega izdelka. Postopek kovanja vedno zajema študijo učinka parametrov postopka na kakovost izdelka in ekonomičnost postopka. Ključ do uspešnega postopka preoblikovanja in doseganje zelene oblike in lastnosti je poznavanje in nadziranje tečenja materiala. Smer tečenja materiala, velikost deformacije in temperatura močno vplivajo na posamezne komponente preoblikovalnega postopa. Tečenje materiala definira mehanske lastnosti glede na lokalno deformacijo in pojavljanje napak, kakor so razpoke na površini in pod njo.

2.1 Preoblikovalni stroji

Za plastično deformacijo kovinskih surovcev se uporabljajo preoblikovalni stroji, ki se med seboj razlikujejo po konstrukciji, načinu delovanja, vrsti pogona itn. Ne glede na to, ali se

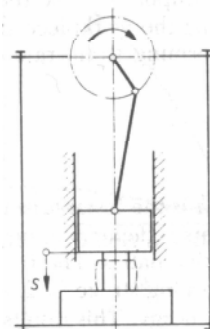


Sl. 3. Shematski prikaz padalnega kladiva

obdelovanci preoblikujejo v celoti ali samo delno oziroma postopoma, pri čemer so preoblikovalna orodja dvodelna, je naloga preoblikovalnega stroja:

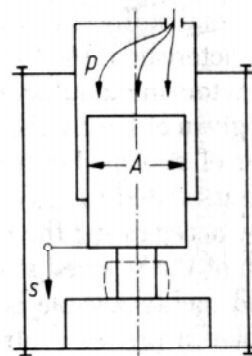
- omogočiti ustrezno relativno gibanje med posameznimi deli orodja in obdelovancem,
- zagotoviti potrebne sile, momente in energijo,
- prevzeti medsebojno vodenje aktivnih delov orodja.

Glavna značilnost padalnega kladiva je njegova kinetična energija v trenutku, ko se kovalo dotakne kovanca. Pri padalnih kladivih je enaka potencialni energiji ovna, dvignjenega do višine H.



Sl. 4. Shematski prikaz ekscentrične stiskalnice

Pri strojih z omejeno silo je njihova karakteristična veličina tlačna sila, ki jo lahko nastavljamo. Silo lahko omejimo na poljubno največjo vrednost, pehalo z gibljivim delom pa lahko ustavimo v katerikoli legi.



Sl. 5. Shematski prikaz hidravlične stiskalnice

Načelo delovanja hidravlične stiskalnice je zasnovano na Pascalovem zakonu.

3 NUMERIČNO SIMULIRANJE POSTOPKA KOVANJA

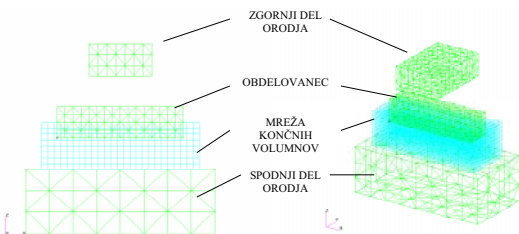
MSC/SuperForge je računalniški program, ki omogoča tridimenzionalno simuliranje za analizo postopka kovanja. Sloni na eksplisitni časovni integraciji ter omogoča, da se izvaja simuliranje za

širok spekter materialov in geometrijske nelinearnosti. Postopek kovanja je po naravi zelo nelinearen in prehodni postopek, tipično opisan z veliko tridimenzionalno deformacijo in stalno spreminjajočih se robnih pogojih. V večini primerov je začetna oblika preprosta, toda končna oblika odkovkov je običajno zahtevna, zaradi česar je potrebno večfazno kovanje. To so glavni razlogi, da je podjetje MSC razvilo program, ki je zasnovan na metodi končnih prostornin, ne pa kakor večina programov, ki so zasnovani na metodi končnih elementov.

Nasprotno kakor pri mreži končnih elementov, ki se med deformacijo spremeni, je računalniška mreža utrjena na nekem izhodišču ter material preprosto teče skozi mrežo končnih prostornin. Ta posebna lastnost naredi MSC SuperForge uporaben za simuliranje velikih materialnih deformacij v postopku kovanja ter hkrati odpravi zahtevo po ponovnem mreženju, ki se običajno pojavi kot glavni problem pri tridimenzionalnem simuliranju s programskimi paketi na temelju MKE.



Sl. 6. Modeli, uporabljeni pri računalniškem simuliranju postopka kovanja



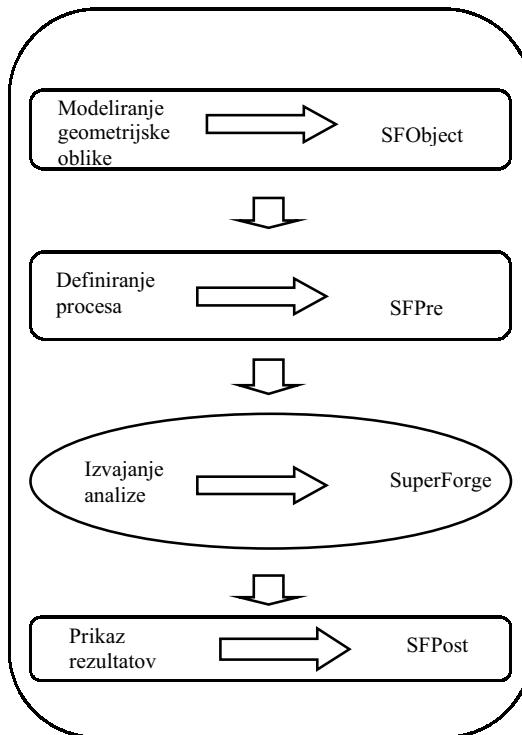
Sl. 7. Prikaz osnovnih elementov pri računalniškem simuliranju

3.1 Modeliranje in mreženje

Prvi korak pri simuliranju kovanja je modeliranje potrebnih delov orodja, obdelovanca in mreže končnih prostornin. Vsak del od naštetih mora biti ločen objekt. Vsak del se najprej modelira in nato zamreži.

Glede na dejstvo, da se orodje med simuliranjem ne deformira, torej je togo, se za mreženje orodja uporablja le površinska mreža. Na enak način, torej s površinsko mrežo, se mreži tudi obdelovanec.

Najpomembnejša zahteva pri mreženju je, da morata biti orodje in tudi obdelovanec mrežen kot zaprta prostorninska mreža, najprej se mreži osnovna



Sl. 8. Postopek izvajanja simuliranja kovanja z MSC/Superforge

geometrijska oblika orodja, šele nato ostale površine orodja. Izvajanje samega simuliranja se lahko v začetni fazi začne z grobo mrežo obdelovanca. Posebej pomembno je, da se mreženje izvaja le z eno obliko elementov. Ti elementi so trikotni površinski elementi TRIA. V zvezi s tem pa je treba upoštevati, da se pri mreženju izvede določena poenostavitev orodja in tudi obdelovanca.

3.2 Določanje parametrov kovanja

Določitev strojev

- ekscentrična stiskalnica
- hidravlična stiskalnica
- padalno kladivo

Določitev materiala

Program upošteva, da je orodje med simuliranjem togo, zato je treba podati le karakteristiko materiala obdelovanca. Mogoč je opis elasto-plastičnega modela materiala. Za kovanje so na voljo specifični materialni modeli.

Pri kovanju nad temperaturo rekristalizacije je vpliv deformacije na napetost tečenja zanemarljiv, medtem ko postane zelo pomemben vpliv stopnje deformacije.

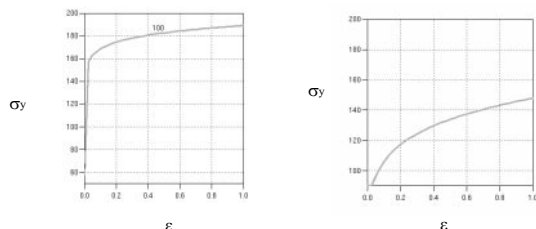
Tako se v predprocesorju (SFPre) lahko določi naslednji materialni model:

$$\sigma_y = \max(S, C\bar{\epsilon}^M \bar{\epsilon}^N) \quad (6)$$

kjer so: C - konstanta tečenja, S - najmanjša napetost tečenja, $\dot{\bar{\epsilon}}$ - dejanska hitrost deformacije, $\bar{\epsilon}$ - dejanska deformacija, M - eksponent stopnje deformacijskega utrjanja, N - eksponent deformacijskega utrjanja.

Za koeficienta C in M pa velja naslednja funkcijska odvisnost:

$$C = C(\bar{\epsilon}, T) \quad M = M(\bar{\epsilon}, T) \quad (7).$$



Sl. 9. Potek napetosti tečenja v odvisnosti od izbranega materialnega modela

Trenje

Če sta dve telesi v stiku in sta prisiljeni, da se gibljeta drsno eno ob drugem, se na dotiku zaradi trenja pojavi strižna napetost. Pogoji trenja zelo vplivajo na tok materiala, porazdelitev tlaka in porazdelitev temperature. Lahko se uporabi eden od dveh danih modelov trenja.

Coulombovo trenje: Za operacije kovanja, ki imajo majhne stične tlake med suhima dotikalnima površinama, je priporočljivo uporabiti Coulombov model trenja. Če strižna napetost trenja doseže kritično vrednost, obdelovanec zdrсне po orodju. Po Coulombovem zakonu trenja je ta vrednost podana s:

$$\tau_s = \mu \sigma_n \quad (8),$$

kjer sta: μ - koeficient trenja, σ_n - normalna napetost na dotiku obdelovanec/orodje.

Plastično strižno trenje, v literaturi se pojavlja tudi kot Trescov model trenja.

Tukaj začne obdelovanec drseti po orodju, če strižna napetost trenja prekorači določen faktor m strižne napetosti tečenja pri strigu in je podan s:

$$\tau_s = m \tau_y \quad (9).$$

Vrednost nič prikazuje primer idealnega drsenja, kar pomeni, da ni nikakršnega trenja ali striga na dotiku obdelovanec/orodje. Vrednost ena prikazuje stično trenje in pomeni, da je strižna napetost trenja enaka napetosti tečenja v primeru striga. Za postopke kovanja, ki imajo velike stične pritiske, je bolj primerno uporabljati ta model trenja.

Določitev začetka simuliranja

Ko imamo podane vse potrebne parametre, je treba podati le še začetek simuliranja. V tem koraku

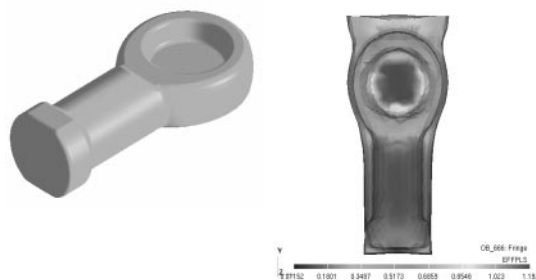
je treba definirati posamezne karakteristike posameznih delov sklopa kovanja. Določi se točka dotika spodnjega dela orodja z obdelovancem ter točka dotika obdelovanca z zgornjim delom orodja. Ko sta ti točki določeni, je vse pripravljeno za začetek analize.

3.3 Analiza rezultatov in prikaz

Prikaz rezultatov se izvaja v modulu postprocesorju (SFPPost). Modul omogoča vnašanje datotek z rezultati in njihov prikaz. Na voljo so naslednje tehnike:

- prikaz deformiranega modela,
- prikaz zahtevanih veličin, kakor so dejanske plastične deformacije, področje temperatur, področje stika, področje tlakov itn.,
- prikaz krivulj, ki povezujejo točke po površini z enakimi vrednostmi določene veličine,
- presečne krivulje,
- animacija.

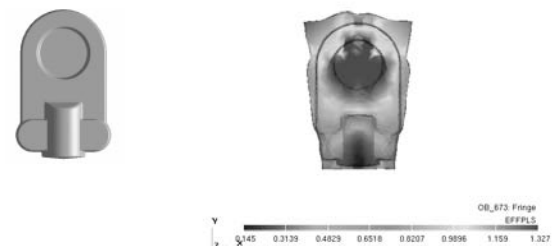
4 PRIMERI ANALIZE ODKOVKOV



a)

b)

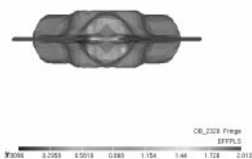
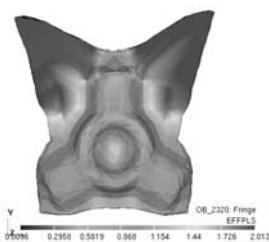
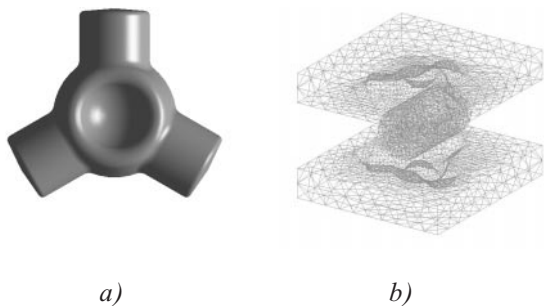
Sl. 9. a) Primer modela ELGES 15168
b) Rezultat simuliranja za ELGES 15168



a)

b)

Sl. 10. a) Primer modela ELGES 15172
b) Rezultat simuliranja za ELGES 15172



Sl. 11. a) Primer modela tronoga
 b) Mreži sp. in zg. dela orodja ter obdelovanca
 c) Rezultat simuliranja tronoga

5 ANALIZA SIMULIRANJA

V primeru računalniške analize priprave odkovkov smo se omejili le na nekatere primere. Numerično orodje omogoča obravnavanje preoblikovanja obdelovanca od trenutka, ko se vsi deli sklopa medsebojno dotaknejo, pa do trenutka, ko se faza kovanja konča. Odmika zgornjega dela orodja po fazi kovanja program ne upošteva. Čeprav traja faza kovanja le delček sekunde, se lahko ta čas razdeli na več korakov, tako da je mogoče spremljati deformacijo obdelovanca med kovanjem v več korakih. Posamezni koraki so shranjeni v datotekah, ki jih je treba le vnesti v poprocesor. Pri vsakem koraku so na voljo zahtevani rezultati stika, temperature, tlakov in deformacij. Tako je omogočeno podrobno spremljanje spreminjanja omenjenih parametrov. Seveda pa je boljše rezultate mogoče dobiti z drobnejšo mrežo.

Preglednica 1. Rezultati simuliranja odkovka ELGES 15172

		EFFSTS MPa	EFFPLS
1 korak	MIN	24,8	0
	MAKS	143	0,31
2 korak	MIN	57,3	0
	MAKS	147,9	0,69
3 korak	MIN	56,5	0,003
	MAKS	157,2	1,27
4 korak	MIN	117,2	0,14
	MAKS	151,1	1,46
5 korak	MIN	101,1	0,22
	MAKS	146	1,58
6 korak	MIN	71,4	0,24
	MAKS	143,7	1,64

Osnovne prednosti računalniškega simuliranja so:

- izboljšanje proizvodnih parametrov postopka kovanja,
- boljše in kakovostnejše razumevanje tečenja materiala,
- boljši vpogled v postopek preoblikovanja,
- zmanjšanje neizpoljenosti in gub,
- možnosti za analiziranje lomov orodja,
- izboljšanje tehnoloških parametrov postopka.

Poglaviti problem pri tem simuliranju je, da na voljo ni ustreznih materialnih podatkov, saj je spekter materialov za kovanje dokaj velik. Drugi glavni problem pa je ustrezna računalniška oprema.

Ker se pri postopku kovanja pretvarja začetna oblika obdelovanca v končno obliko, ki mora imeti določeno obliko in izmero, se lahko z uporabo programa te izmere preverijo. Prav tako pa je mogoče iz analize sklepati na izpolnjenost gravur. Točnost teh rezultatov je odvisna od gostote mreže končnih prostornin.

6 SKLEP

V praktičnih primerih, ko imamo zapletene geometrijske oblike, je analitično reševanje neizvedljivo, zato je primerno uporabiti računalniško simuliranje analiziranja postopka kovanja. Omeniti velja tudi, da je eksperimentalno nadziranje postopka kovanja izredno zahtevno in težavno, saj je temperatura obdelovanca nad 1200 °C, proces pa zelo sunkovit. Numerični del raziskave se je izvedel na FS Maribor v laboratoriju za transportne naprave, sisteme in logistiko. Eksperimentalni del raziskave je bil izveden v podjetju Unior d.d.. V prispevku smo želeli prikazati postopek h celoviti analizi simuliranja postopka kovanja. Vse analize in simuliranja so bile izvedene s komercialnim programskim orodjem MSC/SuperForge, ki temelji na metodi končnih prostornin (MKV), na HP 9000-712/60, 128 MB RAM. Še posebej

je treba poudariti, da je to najmanjša potrebna konfiguracija za podporo uporabljenemu programu. V primeru zahtevnejših analiz so zahteve po RAM-u znatno večje. Z računalniškim simuliranjem pa postane postopek kovanja veliko bolj nadzorovan, saj je mogoče s spreminjanjem vhodnih karakteristik vplivati na postopek in opazovati posledice sprememb.

Za določeni material obdelovanca se lahko spreminja geometrija modela, gostota mreže vseh delov, ki so potrebni za simulacijo, kinematika preoblikovalnih strojev, s tem pa tudi hitrost deformacije.

Za uspešno opravljeno računalniško simulacijo postopka kovanja je potrebno:

- numerično orodje,
- ustrezna strojna računalniška oprema,
- ustrezne baze podatkov materialnih lastnosti,
- poznavanje kinematike preoblikovalnih strojev,
- pravilni pristop k modeliranju postopka kovanja.

V tehničnem načinu obravnavanja problema kovanja si vedno prizadevamo za poenostavitve s

poudarkom na obravnavanju posebnih zahtev, ki odločilno vplivajo na kakovost simulacije. Moramo se zavedati, da je takšno delo zelo zahtevno in je v veliki meri odvisno od stopnje poznavanja in razumevanja na eni strani ter možnosti za čim bolj celovito upoštevanje pomembnih vplivov na postopek kovanja na drugi. Medtem ko tako poznavanje kot tudi razumevanje problema temeljita predvsem na pridobljenem znanju, izkušnjah in sposobnostih intuitivnega razmišljanja, je upoštevanje vpliva posameznih parametrov v veliki meri vezano na identifikacijo dejavnika samega, nato pa še na analizo njegove vplivnosti. Prav zaradi pomanjkljivosti, ki izhajajo iz človekove omejene zmožnosti intuitivne analize tako zapletenega problema, so možnosti, ki jih ponuja računalniško podprto izvajanje inženirskih analiz, zelo velike.

Omeniti velja, da so računalniško pridobljene izkušnje vredne prav toliko kot empirične (preizkusi) ter so največkrat cenejše in vsebinsko izrazitejše.

7 SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

$^{\circ}\text{C}$	temperatura v stopinjah Celzija	$\dot{\varepsilon}$	dejanska hitrost deformacije
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	tenzor deformacijske hitrosti	ε_{ij}	deformacijski tenzor
u_i	komponente hitrosti	$\bar{\varepsilon}$	dejanska deformacija
σ_{ij}	napetostni tenzor	M	eksponent hitrosti deformacije
$f(\sigma_{ij})$	funkcija tečenja	N	eksponent deformacijskega utrjanja
σ_y	napetost tečenja	τ_s	strižna napetost
n	koeficient deformacijskega utrjanja	μ	koeficient trenja
H	višina	σ_n	normalna napetost
C	konstanta tečenja	m	faktor strižne napetosti
S	najmanjša napetost tečenja	τ_y	strižna napetost tečenja

8 LITERATURA

- [1] Dieter, E. G. (1998) Mechanical metallurgy. *McGraw-Hill Book Company*, UK.
- [2] Goligranc, F. (1987) Uvod v preoblikovanje. Ljubljana.
- [3] Goligranc, F. (1991) Preoblikovanje. Ljubljana.
- [4] Kobayashi, S., O. Sook-Ik, A. Taylan A. (1989) Metal forming and the finite element metode. *Oxford University Press*.
- [5] Lange, K. (1985) Handbook of metal forming. *USA Michigan Dearborn*.
- [6] MSC/SuperForge user's manual. *The MacNeal-Schwendler Corp.*, Los Angeles, CA 1998.

Naslova avtorjev: mag. Janez Stupan
UNIOR d.d.
Kovaška cesta 10
3214 Zreče

prof.dr. Iztok Potrč
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Mariboru
Smetanova 17
2000 Maribor

Prejeto:
Received: 7.3.2000

Sprejeto:
Accepted: 20.12.2000