

# Numerična simulacija procesa izdelave ingotov po EPŽ postopku

## Numerical Simulation of ESR Ingots Production

B. Štok, N. Mole, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

*Izdelan je bil ekspertni program za računalniško simulacijo procesa izdelave ingotov po EPŽ postopku. V analizi smo se omejili na zasledovanje termomehanskega stanja pri ohlajanju ingota, pri čemer so bili upoštevani ustrezni robni pogoji, temperaturno odvisne snovne lastnosti ter rast ingota. Glede na ustreznost oziroma neustreznost termomehanskega stanja lahko projektant-tehnolog EPŽ postopka ustrezno spreminja vhodne parametre procesa ter s tem ustrezno optimira postopek tako v energijskem, kakor tudi v metalurško-trdnostnem smislu.*

### 1 Namen računalniške simulacije toplotnih procesov

Današnji čas izredno intenzivnega razvoja na področju novih materialov ter z njimi povezanih tehnologij postavlja pred nas zelo zahtevno nalogo. Kvalitetno projektiranje tehnoloških procesov, ki vključuje konstrukcijo orodja in določitev preostalih tehnoloških parametrov samega procesa, zahteva tako kompleksno znanje, da ga danes zaradi specifičnosti in specialnosti posameznih segmentov v procesu projektiranja ne more obvladati en sam človek. Poleg tega so mnogi tehnološki, pa tudi konstrukcijski parametri pridobljeni z izkušnjami in njihovo ozadje mnogokrat ni dovolj raziskano. Neposredno upoštevanje izkušenj, ne da bi pri tem podrobneje poznali mehanizme, ki so jih pogojevali, lahko vodi do povsem zgrešenih tehnoloških rešitev. Ob ustrezni eksperimentalni podpori, ki naj zagotovi pravilno identifikacijo v tehnološkem procesu prisotnih parametrov, se uspešna rešitev tako kompleksnega problema nedvomno nakazuje v možnosti ustreznega matematičnega modeliranja, njegove numerične implementacije ter končno računalniške simulacije obravnavanega problema. Že s tem, da se pri opazovanju tehnološkega procesa omejimo zgolj na spremljanje termomehanskega stanja, lahko ugotovimo, da je poznavanje tega ključnega pomena pri določitvi takih tehnoloških parametrov, ki naj zagotovijo zahtevano kvaliteto končnega izdelka.

Velika večina tehnoloških procesov je karakterizirana s tem, da se med potekom procesa termomehansko stanje intenzivno spreminja. Običajno gre pri teh procesih tudi za sorazmerno hitro spreminjanje temperaturnega stanja, ki posredno vpliva na spremembo mehanskega stanja. Nezmožnost obvladovanja procesa v smislu kontroliranega razvoja temperaturnega stanja, predvsem iz vidika naglih sprememb le-tega, se kaže v intenzivnem deformiranju materiala ter visoki stopnji zaostalih napetosti v končnem izdelku.

Iz ugotovljenega lahko zaključimo, da bi računalniška simulacija kateregakoli tehnološkega procesa, ki je sicer karakteriziran z ustreznimi spremenljivimi termomehanskega stanja, nudila vse potrebne elemente za optimiranje procesa, če bi jo le izvedli v zgodnji fazi projektiranja procesa. Ne glede na obilico razpoložljivih univerzalnih komercialnih računalniških programov, ki običajno povsem zadovoljivo

rešujejo parcialne probleme, je za simulacijo specifičnega tehnološkega procesa potrebno zagotoviti ustrezni ekspertni program.

V prispevku predstavljamo ekspertni program za simulacijo procesa izdelave ingotov po EPŽ postopku. Ob predpisanih delovnih pogojih omogoča program zasledovanje termomehanskega stanja v ohlajevanem ingotu.

### 2 Značilnosti toplotnih procesov

Proces prevoda toplote, ki je prisoten skoraj pri vsakem tehnološkem procesu, je ključni generator sprememb termomehanskih stanj v materialu. Neposredno se njegov vpliv kaže v časovno in prostorsko spremenljivem temperaturnem polju. To že zaradi svoje prostorske spremenljivosti povzroča v materialu neenakomerne deformacije, katerih neposredna posledica je pojav termičnih napetosti. Ker so snovne lastnosti, ki sicer bistveno vplivajo na potek termomehanskega procesa, največkrat tudi močno odvisne od temperature, je termomehansko stanje pravzaprav skupek različnih učinkov, ki se kažejo v veliki nelinearnosti problema. V splošnem imamo torej opravka z izredno kompleksnimi robnimi problemi, ki so zaradi nestacionarnega prevoda toplote izrazito časovno odvisni. Časovna odvisnost termomehanskega stanja je pogojena s spreminjajočim se temperaturnim poljem, samo napetostno polje pa je dodatno odvisno še od razvoja deformacij. Te so velikokrat prav zaradi temperaturne odvisnosti snovnih lastnosti tudi nepovračljive.

### 3 Numerično modeliranje termomehanskih problemov

Ker je analitično reševanje enačb, ki matematično popisujejo obravnavane primere, zelo težavno ali celo neizvedljivo, jih rešujemo numerično. Numerično reševanje matematičnega modela lahko izvedemo z metodo končnih elementov, saj je ta za obravnavo problemov s kompleksnejšimi geometrijskimi in obremenitvenimi pogoji zelo primerna. Nestacionarnost obravnavanih termomehanskih problemov zahteva časovno inkrementalni način numeričnega reševanja, ker časovni potek obremenjevanja bistveno vpliva na termomehansko stanje v kontinuumu.

Numerično modeliranje termomehanskega stanja v kontinuumu, v katerem bistveni izvor notranjih obremenitev predstavlja nestacionarnost temperaturnega polja,

vklučuje tako toplotno kot deformacijsko-napetostno analizo. Vključitev realnih robnih pogojev v numerični model in upoštevanje pravih vhodnih podatkov, to je začetnih in robnih pogojev, ter snovnih podatkov v fazi same simulacije, je bistvenega pomena za pravilnost dobljenih rezultatov. Posebno je potrebno poudariti vpliv, ki ga imajo velike spremembe temperature na temperaturno odvisnost snovnih lastnosti ter s tem tudi na dejansko termomehansko stanje.

#### 4 Modeliranje procesa elektroretaljevanja pod žlindro

V analizi realnega problema smo se omejili na zasledovanje dogajanj pri ohlajanju ingota, pridobljenega po postopku elektroretaljevanja pod žlindro. Elektroretaljevanje ingota pod žlindro je nestacionarni proces, katerega poglaviti vzrok nestacionarnosti izhaja iz rasti ingota. Posledica tega je nestacionarno temperaturno in deformacijsko-napetostno polje v ohlajevanem ingotu. Ob nestacionarnosti pa je dani problem še geometrijsko, prav tako pa tudi materialno nelinearen. Geometrijsko je nelinearen zaradi rasti ingota, materialno pa zaradi spremenljivih snovnih lastnosti ter plastičnih deformacij, kot posledice velikih temperaturnih sprememb med ohlajanjem ingota. Gre torej za izredno kompleksen robni problem, ki se odraža v časovno spremenljivih robnih pogojih.

Pri numeričnem modeliranju tako kompleksnega robnega problema moramo zagotoviti čimbolj pravilno upoštevanje posebnosti, ki so za opazovani proces značilne. Ta zahteva posredno pogojuje časovno in krajevno diskretizacijo problema. Mreža končnih elementov, s katero diskretiziramo območje ingota, je časovno spremenljiva, saj se mora zaradi rasti ingota prilagajati trenutnim robnim pogojem ingota. Rast ingota modeliramo tako, da časovnemu zaporedju intervalov priredimo zaporedje novih dodanih plasti končnih elementov. Velikost časovnega koraka je odvisna od podane hitrosti pretaljevanja, debelina dodane plasti pa je konstantna in je pogojena z velikostjo pomika dna ingota. Prav tako je gostota diskretizacije prilagojena gradientu opazovanih veličin, s čimer zagotovimo korektno aproksimacijo numerične rešitve. Tako je v območju kristalizatorja, kjer je hlajenje ingota zelo intenzivno, mreža končnih elementov primerno zgoščena. V delu ingota, ki je oddaljen od kristalizatorja, zaradi česar se tu vzpostavi kvazi stacionarno stanje, pa je mreža končnih elementov v smeri osi ingota redkejša.

Oblika kovinske kopeli je odvisna od globine kopeli, ki jo za vsak izbrani primer definiramo. Prav tako definiramo količino odvedene toplote iz ingota v kristalizator ter njeno porazdelitev po višini kristalizatorja. Fazno spremembo, do katere pride pri strjevanju ingota, spremlja pojav sproščanja latentne toplote, ki je upoštevan v matematičnem modelu.

#### 5 EPŽ/s—program za računalniško simulacijo

Kot primer modeliranja termomehanskih pojavov smo izdelali ekspertni računalniški program za simulacijo elektroretaljevanja ingotov pod žlindro. Za to področje izdelave ingotov je na voljo dovolj praktičnega in eksperimentalnega znanja v Železarni Ravne, prav tako pa je tudi proces metalurško in termomehansko dovolj raziskan. Oboje je izredno pomembno v fazi preverjanja rezultatov računalniške simulacije.

Program EPŽ/s je namenjen računalniški simulaciji tehnološkega postopka elektroretaljevanja ingotov pod žlindro. Simulacija omogoča časovno sledenje rasti ingota

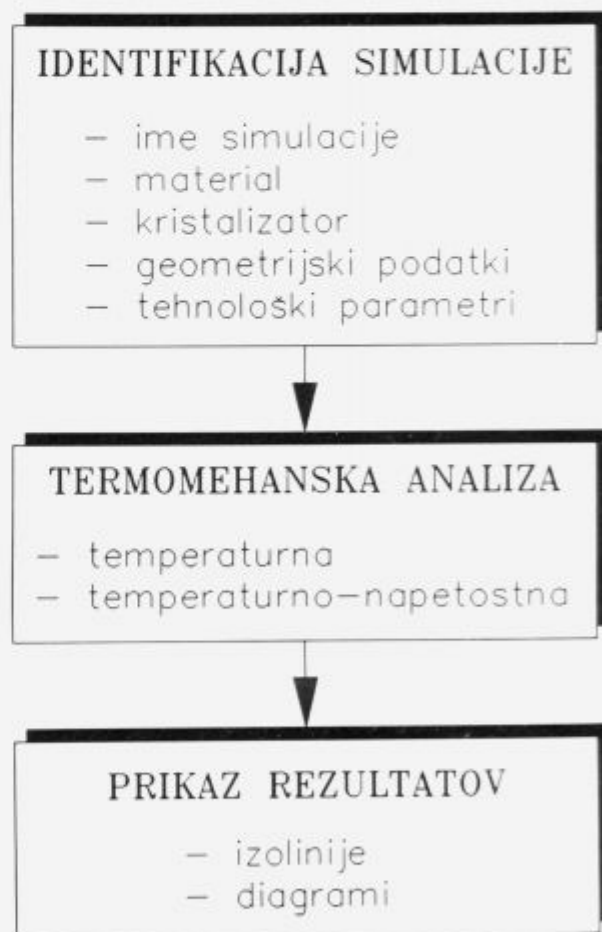
ter sprotno spremljanje spremembe termomehanskega stanja v njem.

Program vključuje:

- interaktivni vnos:
  - podatkov o geometriji in materialu ingota
  - obratovalnih parametrov procesa
- temperaturno in napetostno analizo
- grafični prikaz rezultatov simulacije:
  - polja veličin termomehanskega stanja
  - potek veličin termomehanskega stanja v izbranih prerezih.

S tem, da omogoča računalniška simulacija kvalitativni vpogled v spreminjanje termomehanskega stanja skozi celotno zgodovino rasti ingota, je dana možnost analize vpliva posameznih parametrov procesa in njihovega optimiranja.

Zgradbo programa ter povezavo med posameznimi deli programa prikazuje diagram poteka (slika 1).



Slika 1.

Figure 1.

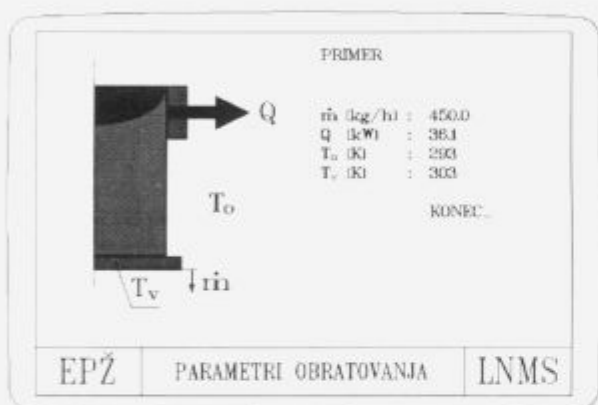
Poljubna simulacija je karakterizirana z globalnimi značilnostmi, ki izhajajo iz lastnosti pretaljevanega materiala ter lastnosti kristalizatorja na eni strani in preostalimi

značilnostmi, ki vključujejo načeloma spremenljive parametre procesa, na drugi strani. Vsako novo imenovano simulacijo z ustreznim podatkovnim naborom vključimo v knjižnico že izvedenih simulacij.

Snovne lastnosti pretaljevanega ingota izberemo s tem, da iz dane podatkovne knjižnice za material izberemo ustrezeni material, na isti način izberemo tudi tip kristalizatorja za obravnavano simulacijo.

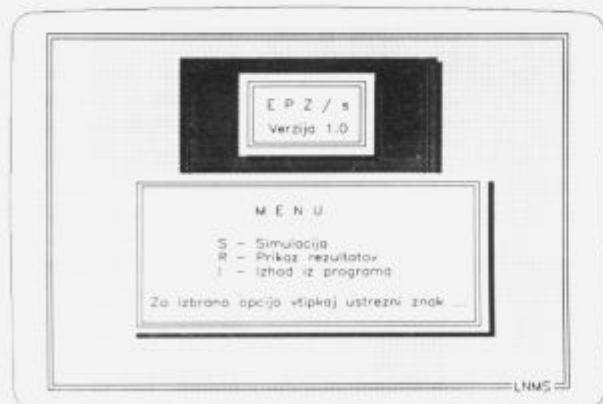
Geometrijski robni pogoji vključujejo velikost premera ingota, globine kovinske kopeli ter predvideno celotno dolžino ingota.

Tehnološki parametri procesa vključujejo velikosti talilne hitrosti, odvedene toplote, temperature okolice ter temperature nosilne plošče ingota (slika 2).



Slika 2.  
Figure 2.

Potem, ko smo definirali vse za simulacijo potrebne podatke, pri čemer je vnos podatkov posamičen z možnim popravkom že vnešenih vrednosti, se na zaslonu izriše menu, ki opredeljuje nadaljnje možnosti programa. Le-te zajemajo računalniško simulacijo z analizo termomehanskega stanja in grafični prikaz veličin termomehanskega stanja ali tudi regularen zaključek dela z izhodom iz programa (slika 3).



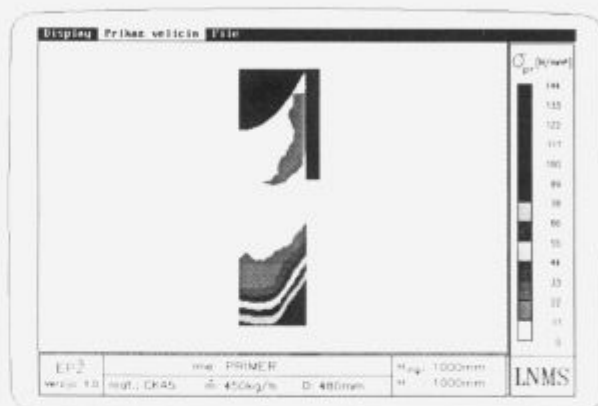
Slika 3.  
Figure 3.

V okviru računalniške simulacije obravnavanega postopka dobimo kot rezultat celotno zgodovino simulirane rasti ingota. Program omogoča za poljubno dolžino ingota,

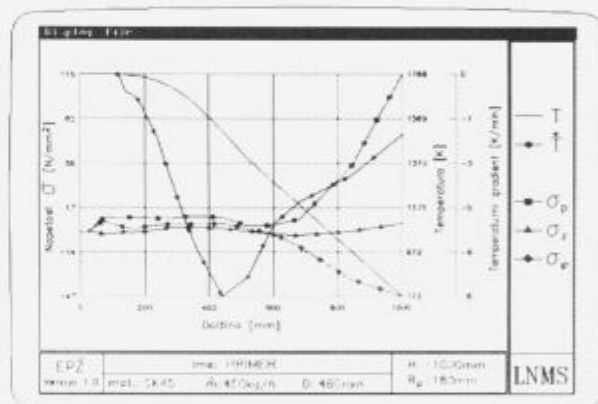
ki je v mejah že simulirane dolžine ingota, grafični prikaz krajevnega spreminjanja veličin termomehanskega stanja.

Prikazovanje je možno:

- za celotno območje ingota v obliki prikaza izolinij (slika 4)
- za izbrani prečni ali vzdolžni prerez v obliki diagrama (slika 5).



Slika 4.  
Figure 4.



Slika 5.  
Figure 5.

Izdelani računalniški program EPŽ/s omogoča z računalniško simulacijo izdelave ingotov po EPŽ postopku spremljanje razvoja termomehanskega stanja v ohlajevanem ingotu. Glede na njegovo ustreznost oziroma neustreznost lahko projektant-tehnolog EPŽ postopka ustrezno spreminja vhodne parametre procesa ter s tem ustrezno optimira postopek tako v energijskem, kakor tudi v metalurško-trdnostnem smislu.

Glede na to, da zahteva pravilna simulacija temeljito poznavanje snovnih lastnosti, je izdelani software v tistem delu, ki zajema knjižnico podatkov o materialu, pa tudi o samih toplotnih razmerah, potrebno stalno dograjevati.

## 6 Zaključne ugotovitve

Ne glede na kompleksnost obravnavane problematike, zaradi katere so v samem matematičnem modelu prav gotovo morebitne nedorečenosti, smo mnenja, da predstavlja

program EPŽ/s velik korak naprej v iskanju odgovora na izzive našega časa. Po eni strani je pomembna ugotovitev, da smo s ciljem, ustvariti novo kvaliteto razmišljanja ter delovanja, sposobni znotraj lastnega prostora uspešno združiti interdisciplinarna znanja ter ljudi, ki ta znanja obvladajo. To mora biti nedvomno vodilo nadaljnjega razvoja. Po drugi strani pa lahko kljub dejstvu, da bi bilo mogoče v program vgrajeno znanje še nadgraditi, ugotovimo, da lahko predstavlja program tisto orodje, s katerim bomo pri dejanski simulaciji procesa prišli do nadaljnjih spoznanj. Vključevanje tako pridobljenih novih izkušenj v sam proces načrtovanja tehnološkega postopka pa bo prinašalo željene učinke za izboljšanje kvalitete ter racionalizacije stroškov.

## 7 Literatura

- <sup>1</sup> B. Štok, N. Mole, M. Švajger, B. Jelen, D. Vodeb, B. Koroušič: Global Interdisciplinary Approach to Mathematical Modelling of Electroslag Remelting. The First European East-West Symposium on Materials and Processes—MatTech'90, Helsinki, 1990
- <sup>2</sup> B. Štok, N. Mole, M. Švajger, M. Zajc: Finite Element Modelling and Simulation of Electroslag Remelting Process, Third International Conference on Technology of Plasticity, Kyoto, 1990