

RAZVOJ MODELA ŠIRJENJA MED TOPLIM PROSTIM KOVANJEM

DEVELOPMENT OF THE MODEL FOR THE PREDICTION OF SPREADING DURING HOT OPEN-DIE FORGING

¹Matjaž Knap, ¹Goran Kugler, ¹Milan Terčelj, ¹Radomir Turk,
¹Celestin Nzobandora, ²Heinz Palkowski

¹Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, Aškečeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija
²Tehniška univerza Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Nemčija
matjaz.knap@uni-lj.si

Prejem rokopisa – received: 2004-09-20; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-11-05

Avtomatizacija tehnologije toplega prostega kovanja je bistvenega pomena za izboljšanje gospodarnosti proizvodnje in kvalitete izdelkov, kovanih na hidravlični stiskalnici. Dosedanji modeli napovedovanja prostega širjenja so za ta namen presplošni in premalo natančni, kar je bilo potrjeno tudi z njihovo uporabo v programu za simulacijo toplega prostega kovanja HFS (Hot Forging Simulator).

Pri razvoju novega modela, ki upošteva večje število vplivnih parametrov, so bili uporabljeni naslednji postopki:

- spremljanje parametrov in merjenje širjenja vzorcev med fizikalnim simuliranjem v laboratoriju
- meritve parametrov kovanja v industriji
- analiza lokalnega toka materiala z metodo končnih elementov in
- obdelava rezultatov meritev in analiz z nevronske mreže

Za napovedovanje prostega širjenja sta bila uporabljena dva načina: funkcijski zapis in napovedovanje z uporabo nevronske mreže. Natančnost napovedovanja z obema modeloma je veliko večja kot pri sedaj uporabljenem modelu.

Ključne besede: deformacija, toplo prosto kovanje, prosto širjenje, modeliranje, nevronske mreže in napovedovanje širjenja

The automatization of open-die forging technology is essential for cheaper production and better quality products. The current models for the prediction of spreading are too general and, consequently, not sufficiently accurate, which was confirmed by using Hot Forging Simulator software (HFS).

The methods applied for the model development that include more influential parameters, are the following:

- the registration of parameters and measurements of workpiece spreading during the laboratory physical simulations
- industrial measurements
- the analysis of local material flow with the FE method
- the treatment of measurement results and analysis with neuronal networks

Two models for the prediction of free spreading were proposed: prediction in the form of a function and prediction by applying neuronal networks. The accuracy of the predictions with both new models is much better than that with the current model.

Key words: deformation, hot open-die forging, free spreading, modelling, neuronal networks and prediction of spreading

1 UVOD

Sodobne usmeritve v tehnologiji vročega prostega kovanja so naravnane v kovanje izdelkov z znanimi mehanskimi lastnostmi in v povečevanje ekonomičnosti proizvodnje, kar zahteva vnaprej predpisano in kontrolirano vodenje tehnologije^{1,2,3}. Ena izmed nalog pri postavitvi nove kovaške stiskalnice 30 MN v podjetju Metal Ravne je bila iskanje optimalnega načina kovanja določenega izdelka.

Sedanje stanje merilne tehnike še ne omogoča "on-line" prilagajanja tehnologije trenutni obliki preoblikovanja, zato je naša skupina razvila programski paket HFS (Hot Forging Simulator)⁴, ki na podlagi modelov izračuna predvidene časovne poteke spreminjanja geometrije in temperature preoblikovanja ter obremenitev kovaške stiskalnice med kovanjem. Izračuni so osnova, na podlagi katere tehnolog določi optimalno tehnologijo kovanja izbranega izdelka.

Izkušnje pri uvajanju programskega paketa v proizvodnjo so pokazale, da sta modela za opisovanje spreminjanja temperature preoblikovanja in sile kovanja ustrezna, model za opis spreminjanja geometrije, tj. širjenja med kovanjem, pa je premalo natančen za še optimalnejše vodenje procesa, pa tudi v literaturi dostopni podatki, npr. Berger in Neuschütz^{5,6}, potrjujejo naše ugotovitve. Raziskave so bile zato usmerjene v iskanje takega modela napovedovanja širjenja, ki bi omogočil dovolj natančen opis za potrebe programskega paketa HFS.

Vgrajeni Tomlinsonov model prostega širjenja (En. 1)⁷

$$k_s = 0,14 + 0,36 \cdot \left(\frac{b}{w_0} \right) - 0,054 \cdot \left(\frac{b}{w_0} \right)^2 \quad (1)$$

predpostavlja, da je koeficient širjenja k_s ($k_s = \Delta w / \Delta h$) odvisen le od razmerja med dolžino dotikalne površine

(b – bite length) in širino preoblikovanca (w – width), t. i. zgrabitvenega razmerja b/w_0 (bite ratio), druge parametre pa lahko zanemarimo.

Nujnost upoštevanja dodatnih parametrov so v letih med 1980 in 2000 v svojih delih opisali številni avtorji, ki pa so se zadovoljili zgolj s kvalitativnim opisom. Eberlein⁸ je na osnovi preizkusov dokazal, da se različne vrste jekla različno širijo, Berger s sodelavci^{5,6} je ugotovil znaten vpliv razmerja med širino in višino osnovnega prereza (w_0/h_0) na širjenje in tudi, da je širjenje precej odvisno od spreminjanja (nehomogenosti) preoblikovalne trdnosti po prerezu. Kiefer⁹ je z numeričnimi simulacijami dokazal, da sprememba temperaturnega polja po prerezu preoblikovanca vpliva na širjenje. Vpliv ukrivljenosti kontaktne površine na širjenje zaradi predhodnega sodčenja je v svojem delu opisal Fereshteh - Saniee¹⁰.

2 PRIPRAVA PODATKOV ZA RAZVOJ MODELA

Vsi prej omenjeni vplivi, ki jih Tomlinsonov model ne vključuje, zmanjšujejo natančnost modeliranja, zato je pri programiranju vodenja stiskalnice potrebna uporaba prevelikih varnostnih faktorjev. Posledica so daljši časi kovanja in v nekaterih primerih celo ponovno ogrevanje materiala.

Kvalitativni opis vpliva parametrov na širjenje je bilo potrebno za uporabo v modelu kvantificirati. Zato smo kombinirali rezultate meritev širjenja med kovanjem v industriji in fizikalnih simulacij kovanja v laboratoriju, pomagali pa smo si tudi z numeričnimi simulacijami.

2.1 Industrijske meritve

Čas kovanja je omejen z najnižjo temperaturo, ki je za vsako vrsto jekla različna, tipično kovanje poteka od 10 min do 20 min. Za ovrednotenje širjenja so bile uporabljene meritve šestih parametrov, ki se med kovanjem neprekinjeno shranjujejo v podatkovni bazi. Časovni korak meritev je 10 ms, zato podatkovna baza vsebuje 60.000–120.000 meritev vsakega parametra.

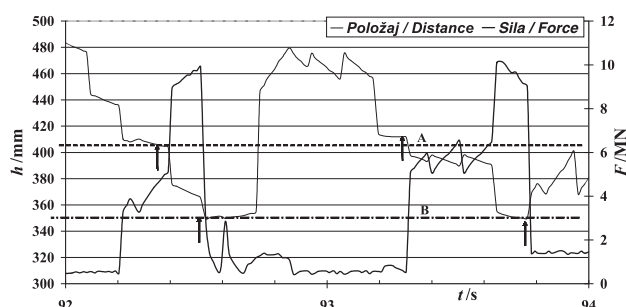
Podatke je bilo treba najprej sistematično urediti. Izločanje neustreznih in za nadaljnjo obdelavo nepotrebnih podatkov je potekalo na osnovi različnih algoritmov. Istočasno je potekala tudi identifikacija posameznih prehodov kovanja. Pričakovali smo, da bomo sistematizacijo podatkov lahko popolnoma avtomatizirali, vendar je pester spekter načinov kovanja in kovanih izdelkov to onemogočil. Obdelava je bila zato izredno dolgotrajna.

Širjenje v i -tem prehodu (slika 1) je bilo izračunano z uporabo enačbe:

$$\Delta w^i = h_{i,d}^{i+1} - h_{k,m}^{i-1} \quad (2)$$

(t. d. – točka dotika, k. m. – kovana mera).

Točka dotika, to je položaj orodja, ko se ta dotakne preoblikovanca, je bila določena na osnovi primerjave



Slika 1: Prikaz natančnosti določitve točke dotika (A) in kovane mere (B) pri dveh poljubno izbranih udarcih

Figure 1: Presentation of two significant points for two arbitrary blows, point of the contact (A) and forging dimension (B)

izmerjenih vrednosti hitrosti gibanja orodja, položaja orodja in sile stiskanja. Natančnost določitve te točke je slabša (cca. $\pm 5\% \Delta h$) kot določitve kovane mere, ki je natančno določena z enim samim podatkom, tj. najnižjim položajem orodja.

Rezultati industrijskih meritev so bili razen s sipanjem, ki je posledica nenatančno določene točke dotika, obremenjeni tudi z napako, ki jo povzroči krivljenje ingotov.

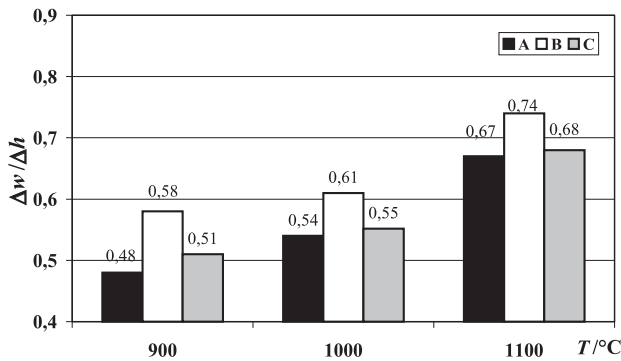
Kritična analiza dobljenih rezultatov je pokazala, da bi bil – ob predpostavki ravnosti preoblikovanca – tovrstni način merjenja širjenja dovolj natančen za potrebe adaptacije modela. Nagib in ukrivljenost osi odkovka sta močno omejevala uporabnost rezultatov, zato so bile za razvoj modela potrebne dodatne raziskave.

2.2 Fizikalne simulacije

Vpliv razmerja med geometrijo preoblikovanca in orodjem ter vpliv temperature sta bila določena v okviru teorije podobnosti z realnim procesom kovanja. Fizikalne simulacije so bile narejene na simulatorju termomehanskih metalurških stanj Gleeble 1500, ki je omogočil natančno simuliranje dogajanja med toplim prostim kovanjem.

Pri fizikalnih simulacijah smo se omejili na tri jekla: OCR12VM, UTOPMO1 in BRM2, katerih preoblikovalne trdnosti so bile že znane. Največja dimenzija stranice osnovnega prereza kvadra je bila 15 mm, razmerje 3 : 1 je bilo izbrano kot največje razmerje med širino in višino osnovnega prereza, dolžina vseh vzorcev pa je bila enotna: 70 mm. Zaradi podobnosti trenjskih razmer so bili vzorci narejeni z rezkanjem. Za določitev vpliva dolžine dotikalne površine, tj. pomika manipulatorja, na širjenje so bila uporabljena ravna orodja štirih različnih dolžin: 10,0 mm, 12,5 mm, 15,0 mm in 20,0 mm.

Preizkusi so bili narejeni do deformacije 0,30 (postopoma 0,10 ali 0,20 ali 0,30), s čimer je bilo zajeto celotno območje spreminjanja deformacij med realnim procesom.



Slika 2: Primerjava koeficientov širjenja treh vrst jekel (BRM2 – A, OCR12VM – B in UTOPMO1 – C) pri temperaturah 900 °C, 1000 °C in 1100 °C

Figure 2: Comparison of spreading coefficients for three steels (Wr.-No. 1.3343 – A, Wr.-No. 1.2379 – B and Wr.-No. 1.2343 – C) at temperatures of 900 °C, 1000 °C and 1100 °C

Večina fizikalnih simulacij je bila izvedena pri treh temperaturah (900 °C, 1000 °C in 1100 °C) v temperaturnem intervalu, v katerem poteka toplo industrijsko kovanje, nekaj preizkusov je bilo narejenih tudi pri višji in nižji, za kovanje izbrane vrste jekla tehnološko utemeljeni temperaturi. S tem je bilo pokrito celotno območje spreminjanja temperature med kovanjem od 850 °C do 1180 °C.

Meritve skrajne točke, tj. največjega širjenja, so bile narejene z optičnim merilnikom z natančnostjo 0,01 mm, ocenjena relativna napaka pri tem načinu merjenja je v velikosti enega odstotka širjenja.

Izmerjena je bila tudi kontura deformiranega vzorca, rezultati so nam rabili kot pomemben podatek za verifikacijo numeričnih simulacij.

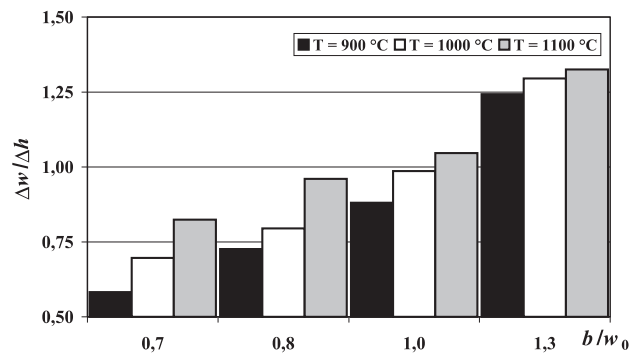
Za vsako od treh jekel je bilo narejenih približno 100 preizkusov pri različnih pogojih. Večina preizkusov je bila izvedena samo enkrat, ponovitve nekaj naključno izbranih preizkusov pa so pokazale, da je ponovljivost na osnovi merjenih parametrov dobra.

Vpliv vrste jekla in temperature

Rezultati fizikalnih simulacij jasno kažejo (**slika 2**), da je koeficient širjenja, tj. razmerje med odvzemom in širjenjem preoblikovanca v skrajni točki, pri jeklu OCR12VM za 15–20 % večji kot za drugi dve vrsti jekla (BRM2 in UTOPMO1). Smer povečevanja koeficienta širjenja z naraščanjem temperature je pri vseh jeklih enaka.

Vpliv razmerja geometrij preoblikovanca in orodja

Vpliv razmerja med **dolžino dotikalne površine in širino preoblikovanca** (b/w_0) je potrdil pričakovanja, da se koeficient širjenja s povečevanjem zgrabitvenega razmerja povečuje (**slika 3**). Prav tako smo ugotovili, da se vpliv temperature s povečevanjem razmerja b/w_0 zmanjšuje.



Slika 3: Vpliv zgrabitvenega razmerja na koeficient širjenja jekla OCR12VM pri treh različnih temperaturah

Figure 3: The influence of the bite ratio on the spreading coefficient at three different temperatures for Wr.-No. 1.2379

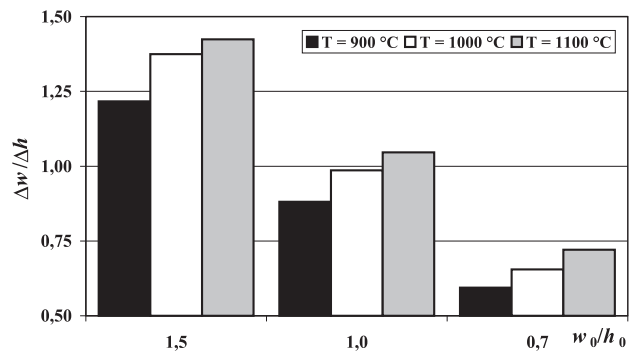
Rezultati preizkusov kažejo precejšen vpliv **razmerja med višino in širino vzorca** (w_0/h_0) na koeficient širjenja. Pri vzorcih z manjšo začetno višino proti širini je bil koeficient širjenja precej večji kot pri širjenju vzorcev z večjo začetno višino kot širino (**slika 4**). Vpliv temperature je bil v celotnem območju spreminjanja razmerja nespremenjen.

2.3 Numerično modeliranje

Numerično modeliranje smo uporabili predvsem zaradi študija vpliva po prerezu nehomogenega temperaturnega polja na prosto širjenje. Za modeliranje je bila uporabljena metoda končnih elementov (FEM – Finite Elements Method), program SUPER FORM 2002¹¹.

Pri modeliranju smo se osredotočili na realno kovanje v industriji, narejenih pa je bilo tudi nekaj izračunov širjenja vzorcev med laboratorijskimi preizkusi. S tem smo dokazali podobnost med realnim industrijskim kovanjem in fizikalnimi simulacijami.

Rezultati izračunov so potrdili vse s fizikalnimi simulacijami ugotovljene zakonitosti, dodatno pa smo dobili vpogled v vpliv temperaturnega polja na koeficient širjenja.



Slika 4: Vpliv razmerja med višino in širino osnovnega prereza na koeficient širjenja jekla OCR12VM pri treh različnih temperaturah

Figure 4: The influence of the ratio of height-to-width of the workpiece cross-section on spreading at three different temperatures for Wr.-No. 1.2379

Tabela 1: Vpliv časa ohlajanja in s tem povezanega temperaturnega gradienta na širjenje jekla OCR12VM**Table 1:** Influence of cooling time and connected temperature gradient on the spreading coefficient for Wr.-No. 1.2379

Čas do prve deformacije t/s	T-interval začetek kovanja $T_1/^\circ\text{C}$	T-interval konec kovanja $T_2/^\circ\text{C}$	Koeficient širjenja $k_s=\Delta w/\Delta h$ absolutno/relativno
35	931 – 1000	906 – 1020	0,327/1,000
155	759 – 1000	771 – 1010	0,339/1,039
335	687 – 999	687 – 1010	0,357/1,091
635	585 – 994	590 – 1005	0,376/1,150

Različno temperaturno polje po prerezu ingota smo modelirali s časom ohlajanja pred deformacijo (**prvi stolpec v tabeli 1**), kar se je izrazilo v temperaturi preoblikovanca na začetku in koncu kovanja (**drugi in tretji stolpec v tabeli 1**).

Večje širjenje ingotov z intenzivnejšim temperaturnim poljem, tj. večjim temperaturnim gradientom, (**zadnji stolpec v tabeli 1**) je v skladu z našimi ugotovitvami kot tudi z ugotovitvami Kieferja⁹.

3 POSTAVITEV NOVEGA MODELA ZA OPIS/NAPOVEDOVANJE ŠIRJENJA

3.1 Nevronske mreže

Za analizo rezultatov in iskanje povezav med vplivi posameznih parametrov, ki vplivajo na širjenje med toplim prostim kovanjem, je bilo uporabljeno eno izmed orodij umetne inteligence, tj. nevronske mreže (CAE NN – Conditional Average Estimator Neuronal Networks), ki smo jih doslej že večkrat koristno uporabili¹²⁻¹⁵.

Model napovedovanja širjenja, ki temelji na uporabi CAE NN, je zaradi fleksibilnosti metode zelo primeren za ugotavljanje medsebojnega prepletanja vplivov geometrije, temperature in vrste materiala. Napovedovanje je odvisno od verodostojnosti podatkovne baze, zato se uspešnost napovedovanja širjenja v področju interpolacije povečuje z reprezentativnostjo podatkov v podatkovni bazi.

Zaradi relativno majhnih razlik pri širjenju različnih vrst jekla so bili podatki za vsako izmed treh jekel obdelani posebej. S tem so se ohranile specifične lastnosti širjenja različnih jekel, ki bi se sicer zaradi podobnosti podatkov izgubile.

Podatkovna baza za vsako jeklo je vsebovala približno 100 modelnih vektorjev (enako številu preizkusov). Iz te podatkovne baze je bilo naključno, v enakem razmerju s celotno podatkovno bazo, kot je to v navadi¹⁶, izbranih približno 25 modelnih vektorjev, ki so tvorili preskusno podatkovno bazo, drugi modelni vektorji pa so sestavljali učno podatkovno bazo. S spreminjanjem različnih kombinacij vhodnih spremenljivk je bilo ugotovljeno, kako upoštevanje oz. neupoštevanje določene spremenljivke vpliva na uspešnost napovedovanja širjenja med stiskanjem vzorcev v laboratoriju.

3.2 Opis modela s funkcijo

Alternativa napovedovanju širjenja z uporabo CAE NN je matematični model, v katerem je predvideno

širjenje podano s funkcijskim zapisom. Tak model je manj občutljiv za vhodne podatke in bolj preprost za uporabo, poleg tega pa je izračun hitrejši. Zato je tudi bolj uporaben za vgraditev v programski paket.

Koeficienti enačbe, s katero je opisan model širjenja, so bili izračunani z metodo glavnih lastnih vektorjev in se ločijo glede na obravnavano jeklo. Podatkovna baza za izračun koeficientov je bila sestavljena iz s CAE NN analiziranih in pripravljenih, **vendar ne popravljenih** rezultatov fizikalnih simulacij.

Na osnovi rezultatov fizikalnih simulacij je jasno, da je za opis širjenja izbrane vrste jekla treba upoštevati vpliv treh geometrijskih parametrov (w_0/h_0 , b/w_0 , $\Delta h/h_0$) in temperature, zato je koeficient širjenja podan kot:

$$k_s = k_1 + k_{(b/w)_1} \cdot (b/w_0) + k_{(b/w)_2} \cdot (b/w_0)^2 + k_{(w_0/h_0)} \cdot (w_0/h_0) \cdot T + k_{(\Delta h/h_0)} \cdot (\Delta h/h_0) \quad (3)$$

Konstante v enačbi morajo imeti take vrednosti, da se izračunane vrednosti najbolj ujemajo z izmerjenimi. Zato je bila definirana funkcija F , ki podaja vsoto kvadratov razlike med izmerjenimi in predvidenimi vrednostmi. Z metodo najmanjših kvadratov določimo take koeficiente, da je vrednost funkcije F najmanjša.

Izraz je po obliki precej podoben Tomlinsonovi enačbi (prvi trije členi so identični). Razlikujeta se po tem, da sta v novem izrazu upoštevani tudi razmerji med širino in višino nedeformiranega preoblikovanca ter med odvzemom in višino, dodan pa je tudi vpliv temperature (podana v stopinjah Celzija). Bistvena razlika med izrazoma pa je v tem, da so pri Tomlinsonovem modelu koeficienti v enačbi neodvisni od izbire materiala, koeficienti nove enačbe pa se spreminjajo glede na izbrano vrsto jekla.

3.3 Verifikacija večje uspešnosti novega modela pri napovedovanju širjenja med kovanjem v industrijskih razmerah

Za verifikacijo na novo razvitega modela (**enačba 3**) je bilo smiselno uporabiti podatke meritev, ki jih je v svojem delu podal Tomlinson. Ti preizkusi so bili narejeni na pilotni napravi v skoraj industrijskih razmerah. Primerjava koeficientov nove enačbe in Tomlinsonove enačbe pokaže, da sta koeficienta, ki opisujeta vpliv b/w_0 , podobna tako po smeri spreminjanja kot po vrednosti, vrednosti proste konstante k_1 pa ne moremo primerjati, ker je njena vrednost v novi enačbi odvisna od dodatnih koeficientov (**tabela 2**).

Tabela 2: Primerjava koeficientov novega modela in koeficientov Tomlinsonove enačbe, izračunanih na osnovi meritev, ki jih je opravil Tomlinson (N je število meritev)

Table 2: Comparison of coefficients from the new and the Tomlinson models (N is the total number of model vectors)

Jeklo	k_1	$k_{(b/w)1}$	$k_{(b/w)2}$	$k_{(w/h)}$	$k_{(\Delta h/h)}$	N
Nov model	0,056	0,323	-0,035	$5,42 \cdot 10^{-5}$	0,237	29
Tomlinson	0,140	0,364	-0,056	—	—	29

Primerjava izračunanih koeficientov širjenja dokazuje, da nova funkcijska zveza natančneje opisuje širjenje, čeprav je bilo območje spreminjanja vplivnih parametrov relativno ozko (slika 5).

Uspešnost uporabe novega modela smo preizkusili tudi pri izračunu tehnologije kovanja s programom HFS. Vrednosti koeficienta širjenja, izračunane z uporabo Tomlinsonovega modela (enačba 1), so bile prevelike, zato je bilo treba pri izračunu tehnologije kovanja ploščatih ingotov uporabiti empirično določene korekcijske faktorje. Z uporabo novega modela ta korekcija ni več potrebna, izračunano širjenje pa je bilo bližje dejanskemu širjenju kot izračunano s korigiranimi Tomlinsonovimi koeficienti (tabela 3). Rezultati meritev v industriji in iz njih izračunani koeficienti širjenja bodo natančnost napovedi še povečali.

Tabela 3: Primerjava z različnimi enačbami izračunanih koeficientov širjenja pri kovanju ploščatega ingota ($b/w_0 = 1,0/2,4$)

Table 3: Comparison with different equations calculated spreading coefficients for the forging of a flat ingot ($b/w_0 = 1,0/2,4$)

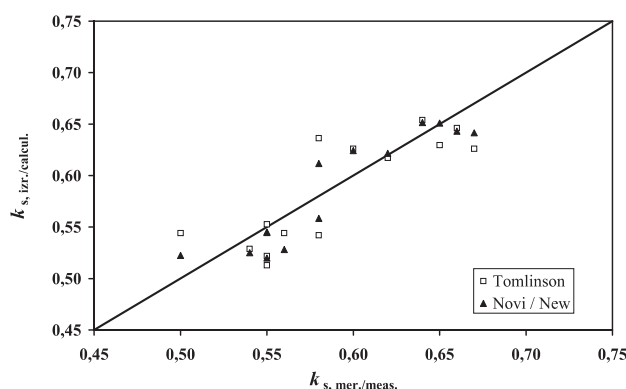
Številka prehoda	Tomlinson brez korekcije	Tomlinson s korekcijo	Nov model
1	0,45	0,35	0,35
2	0,28	0,25	0,16
3	0,20	0,40	0,40
4	0,53	0,46	0,42
5	0,30	0,25	0,18
6	0,20	0,40	0,40

4 SKLEPI

Natančne meritve spremembe geometrije preoblikovanca in "on-line" vodenje sedaj še ni mogoče, tudi izkustveni način, tj. postopno spreminjanje parametrov kovanja, je zaradi neekonomičnosti proizvodnje predraga rešitev. Kot ustrezná rešitev se je pokazala uporaba programa HFS, v katerega je bilo treba vgraditi nov model za napovedovanje širjenja.

Osnova za razvoj novega modela širjenja so bili rezultati fizikalnih simulacij, ki smo jih nadgradili z rezultati meritev širjenja v industriji in rezultati modeliranja z metodo končnih elementov.

Analiza rezultatov z nevronskimi mrežami CAE (preko 300 preizkusov) je pokazala, da je pri napovedovanju širjenja treba upoštevati ne le razmerje med dolžino dotikalne površine in širino preoblikovanca (Tomlinsonov model), temveč tudi dodatna geometrijska razmerja, temperaturo in vrsto jekla. Na osnovi teh ugotovitev je bil razvit model, ki podaja spreminjanje



Slika 5: Primerjava napovedovanja koeficientov širjenja z novim modelom in Tomlinsonovim modelom

Figure 5: Comparison between spreading prediction accuracy with the new and the Tomlinson models

koeficienta širjenja v obliki funkcije (enačba 3) in vsebuje naslednje parametre:

- dolžina dotikalne površine / širina preoblikovanca pred deformacijo
- širina / višina preoblikovanca pred deformacijo
- relativna deformacija
- temperatura in
- vrsta jekla

Večja uspešnost pri napovedovanju širjenja z novim funkcijskim modelom in s CAE NN glede na Tomlinsonov model je bila dokazana tako pri napovedovanju širjenja na pilotni napravi kot tudi pri izračunu tehnologij kovanja v industriji.

5 LITERATURA

- J. N. Pennington: *The future of forging technology*. Modern Metals, 53 (1997), 30–34
- R. Rech, R. Schmidt, W. Schmitz: Forging process optimization concept featuring integrated data management. Stahl und Eisen, 118 (1998) 3, 47–51
- B. Aksakal, F. H. Osman, A. N. Bramley: *Upper-bound analysis for the automation of open-die forging*. Journal of Materials Processing Technology, 71 (1997), 215–223
- R. Turk, M. Knap, G. Kugler: *HFS-hot forging simulator*. RMZ – mater. geoenviron, 49 (2002) 1, 1–8
- B. Berger, E. Neuschütz, P. Braun-Angott: Analyse schmiedetechnischer Kenngrößen beim Freiformschmieden und Berechnung von Schmiedeleplänen. Stahl und Eisen, 10 (1981) 1, 37
- E. Neuschütz, B. Berger, W. Richter-Reichel, E. G. Kämper: *Prozeßrechnersystem zur Programmsteuerung und Datenfassung an einer 16 MN Freiformschmiedeanlage*. Stahl und Eisen, 101 (1991), 641–644

- ⁷ A. Tomlinson, J. D. Stringer: *Spread and elongation in flat tool forging*. Journal of The Iron Steel Institute, 193 (1959), 157–162
- ⁸ L. Eberlein, W. Weber: Einfluß der Umformbedingungen auf den Werkstofffluß beim Recken und Stauchen von Vierkantstahl unter einem Lufthammer. Neue Hütte, 25 (1980), 58–63
- ⁹ B. V. Kiefer, K. N. Shah: *Three-dimensional simulation of open-die press forging*. Journal of Materials Processing Technology, 112 (1990), 477–485
- ¹⁰ E. Fereshteh-Saniee, I. Pillinger, P. Hartley, F. R. Hall: *A three-dimensional study of flow in the fullering process using an elastic-plastic finite-element simulation*. Journal of Materials Processing Technology, 60 (1996), 427–433
- ¹¹ MCS Software GmbH (2002)
- ¹² M. Terčelj, I. Peruš, R. Turk, M. Knap: Application of hybrid approach for the wear prediction of tools for hot forging. Contact mechanics 2003, WIT
- ¹³ R. Turk, I. Peruš, M. Knap: *Modeling and the reliability of calculated flow curves*, Metalurgija, 41 (2002) 1, 23–28
- ¹⁴ M. Terčelj, I. Peruš, R. Turk: Suitability of CAE neural networks and FEM for prediction of wear on die radii in hot forging. Tribology International, 36 (2003) 8, 573–583
- ¹⁵ R. Turk, P. Fajfar, R. Robič, I. Peruš: *Prediction of hot strip mill wear*, Metalurgija, 41 (2002) 1, 47–51
- ¹⁶ K. Velten, R. Reinke, K. Fridrich: *Wear volume prediction with artificial neural networks*, Tribology International 33 (2000) 10, 731–736