

OPIS KRIVULJ TE[^]ENJA JEKEL Z RAZLI[^]NIMI MATEMATI[^]NIMI MODELI

THE DESCRIPTION OF TRUE STRESS - TRUE STRAIN CURVES BY DIFFERENT MATHEMATICAL MODELS

BORIS ARZEN¹, D. SKOBIR¹, B. KOSEC², D. KMETI^{1,3}

¹IMT, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

²Univerza v Ljubljani, NTF - OMM, Aker-eva 12, 1000 Ljubljana

³MATKONER, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19

Natan-no poznanje preoblikovalnih sposobnosti jekel, ki jih prikazujemo s krivuljami te-enja, je pri razvijanju tehnologij preoblikovanja velikega pomena. Najpogosteje jih ugotavljamo s preizkusom, ki je po naravi preoblikovanja -im bolj podoben naravnemu preoblikovalnemu procesu. Krivulje te-enja velikokrat opisujemo z eksperimentalno ugotovljenimi vrednostmi preoblikovalnih trdnosti, ali pa z različnimi matematičnimi izrazi. V delu smo prikazali krivulje te-enja za štiri vrste jekel, ki se po preoblikovalnosti precej razlikujejo. Podali smo jih v obliki eksponentne funkcije in polinoma druge stopnje ter naredili primerjavo med funkcijskimi in dejanskimi vrednostmi preoblikovalnih trdnosti. Namen dela je bil ugotoviti, s katerim matematičnim izrazom lahko preoblikovalne trdnosti opičemo tako, da so razlike med dejanskimi in funkcijskimi vrednostmi najmanjše.

ključne besede: jeklo, deformacija, krivulja te-enja, matematični model

Steel deformation abilities are described by true stress - true strain (stress - strain) curves. Their exact knowledge is of a great importance at development of steel deformation technologies and at construction of remaking devices. The stress - strain curves are established by tension, compression or torsion tests, mainly as possible by similar test like at projected deformation process. The course of stress - strain curves are often pictured by experimental results or by mathematical terms. The mathematical term, by which we wish to describe the deformation abilities of the steel, as exactly as possible, is chosen to get the minimum difference between experimental and functional results. In the paper the true stress - true strain curves of four different steels are represented. The curves were described by exponential and polynomial functions. In the work the differences between functional results and real deformation stresses were presented also. The deformation abilities of the chosen steels were made by compression tests. It is represented that not correct chosen function has a great influence on realistic presentation of the steel deformation abilities, specially at lower and higher deformation degrees.

Key words: steel, deformation, true stress - true strain curve, mathematical model

1 UVOD

Preoblikovalne sposobnosti jekel in drugih kovin pogosto opisujemo s krivuljami te-enja, ki jih nekateri imenujejo tudi krivulje plastičnosti. Njihovo natan-no poznanje je ključnega pomena pri razvijanju tehnologij preoblikovanja kovin, konstruiranju preoblikovalnih naprav in projektiranju ter ugotavljanju nosilnosti kovinskih konstrukcij. Ugotavljamo jih lahko z nateznim, tlačnim ali torzijskim preizkusom. Navadno izberemo preizkus, ki je po naravi preoblikovanja -im bolj podoben obravnavanemu preoblikovalnemu procesu. Potek krivulj te-enja jekel velikokrat opičemo z eksperimentalno ugotovljenimi preoblikovalnimi trdnostmi (napetostmi) - k_f , ali pa z različnimi matematičnimi funkcijami, ki bolj ali manj natan-no opisujejo eksperimentalno dobljene rezultate.

Matematične funkcije, s katerimi želimo -im natan-neje opisati dejanski potek preoblikovalnih trdnosti jekel, izberemo tako, da je razlika med eksperimentalno dobljenimi in funkcijskimi vrednostmi -im manjša. Ponavadi se uporablja eksponentna funkcija, ki pa pri večini jekel ni najprimernejša, ker ne podaja dejanskega napetostnega stanja jekel predvsem pri majhnih deformacijah, pri katerih se jeklo pri-ne deformirati, in velikih

deformacijah, pri katerih je pri projektiranju preoblikovalnih procesov poznanje dejanskih preoblikovalnih trdnosti preoblikovanega jekla velikega pomena.

V prispevku smo prikazali krivulje te-enja za štiri vrste jekel, ki se po večini preoblikovalnih trdnosti in obliki krivulj te-enja precej razlikujejo.

Preizkušali smo naslednje vrste jekel:

- jeklo za cementacijo CK15 (\wedge .1221)
- jeklo za poboljšanje 42CRMO4 (\wedge .4320)
- jeklo za izdelavo patentirane 'ice CK60 (\wedge .1732) in
- avstenitno nerjavno jeklo prokron 11 (\wedge .4571)

2 EKSPERIMENTALNO DELO IN UGOTOVITVE

2.1 Preizkusi stiskanja in preoblikovalna trdnost jekel

Krivulje te-enja smo izdelali na osnovi rezultatov diskontinuirnega tlačnega preizkusa valj-kov, izdelanih iz preizkušanih jekel. Vsi valj-ki so bili enakih dimenzij, premera 10 in višine 12 mm (razmerje 1:2).

Preizkuse stiskanja valj-kov smo naredili na 500 kN preizkuševalnem stroju INSTRON v mehanskem laboratoriju IMT v Ljubljani. Za zmanjšanje trenja na kontaktni površini med preoblikovalnim orodjem in valj-kom

smo uporabljali teflon s koeficientom trenja $\mu = 0,02$. Koeficient trenja smo ugotovili eksperimentalno.

Preoblikovalne trdnosti preizku{anih jekel, izra- unane pri izbranih deformacijah, smo v obliki krivulj prikazali na **sliki 1**, izra- unali pa smo jih z naslednjimi matemati- nimi izrazi (1-4):

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (1)$$

$$k_{fi} = k_{wi} \cdot \eta_i \quad (2)$$

$$k_{wi} = \frac{F_i \cdot h_i}{V_0} \quad (3)$$

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{\mu_i \cdot d_i}{3 \cdot h_i}} \quad (4)$$

kjer pomenijo: φ - logaritemska deformacija, h_0 - za- etna vi{ina valj-ka (mm), h_i - vi{ina valj-ka po stiskanju (mm), d_i - premer valj-ka po stiskanju (mm), k_{fi} - preoblikovalna trdnost (N/mm²), k_{wi} - preoblikovalni odpor (N/mm²), F_i - sila stiskanja (N), V_0 - volumen valj-ka (mm³), ϵ_i - preoblikovalni izkoristek in μ_i - koeficient trenja (za teflon je 0,02).

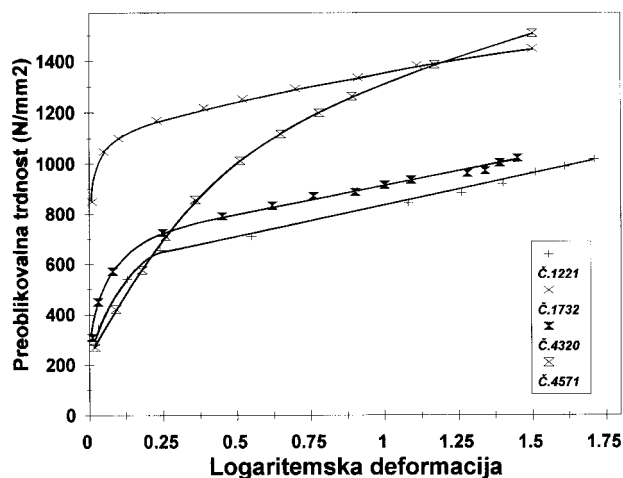
2.2 Funkcijske vrednosti preoblikovalnih trdnosti

Preoblikovalne trdnosti vsakega preizku{anega jekla smo opisali z eksponentno funkcijo (5) in polinomom druge stopnje (6):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (5)$$

$$k_f = A_0 + A_1 \cdot \varphi + A_2 \cdot \varphi^2 \quad (6)$$

V ena- bah (5) in (6) pomenijo C konstanto funkcije (vrednost k_f pri deformaciji $\varphi = 1,0$), n eksponent utrjevanja (tudi konstanta funkcije), -leni A_0, A_1, A_2 pa so koeficienti polinoma druge stopnje.



Slika 1: Preoblikovalne trdnosti preizku{anih jekel v odvisnosti od logaritemske deformacije

Figure 1: True stresses of tested steels in dependence of logarithmic deformation

Pri opisu deformacijskih trdnosti z enim polinomom je med funkcijskimi vrednostmi in rezultati meritev pri{lo pri majhnih deformacijah do prevelikih razlik, zato smo v nadaljevanju vse napetosti podali z dvema polinomoma druge stopnje, katerih veljavnost smo podali z mejno logaritemsko deformacijo φ_m .

Konstanti eksponentnih funkcij in koeficienti polinomov so za preizku{ana jekla podani v **tabeli 1**.

Na **slikah 2 do 5** smo za preizku{ana jekla prikazali funkcijske vrednosti preoblikovalnih trdnosti, izra' ene z eksponentno funkcijo in dvema polinomoma druge stopnje. V diagramih so izmerjene vrednosti preoblikovalnih trdnosti vrisane z znaki, funkcijske vrednosti pa s krivuljami.

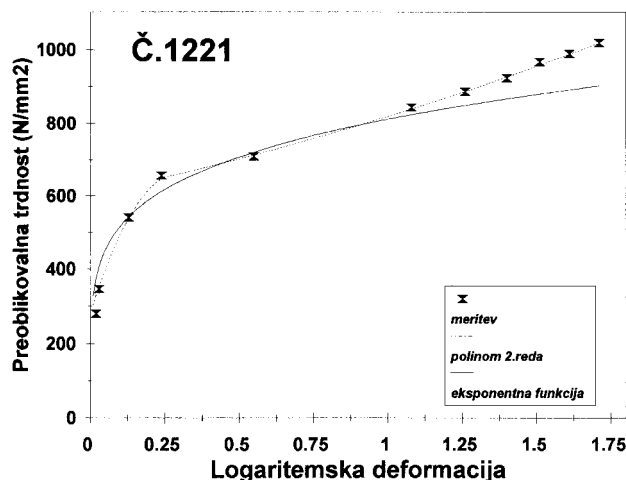
Tabela 1: Konstanti eksponentnih funkcij (C, n) in koeficienti polinomov (A_i) preizku{anih jekel

Table 1: Constants of exponential function (C, n) and constants of polynoms (A_i) for tested steels

	^1221	^4320	^1732	^4571
C	811,653	899,6517	1331,497	1303,843
n	0,19703	0,20894	0,08178	0,45994
A ₀₁	279,49	322,722	882,11	242,55
A ₁₁	2548,76	3892,70	3204,20	2046,63
A ₂₁	-4216,06	-9119,29	-8496,54	-944,91
φ_m	0,24	0,19	0,18	0,36
A ₀₂	607,27	680,41	1108,22	530,04
A ₁₂	172,69	250,63	295,23	1069,59
A ₂₂	40,14	-15,53	-44,76	-279,27

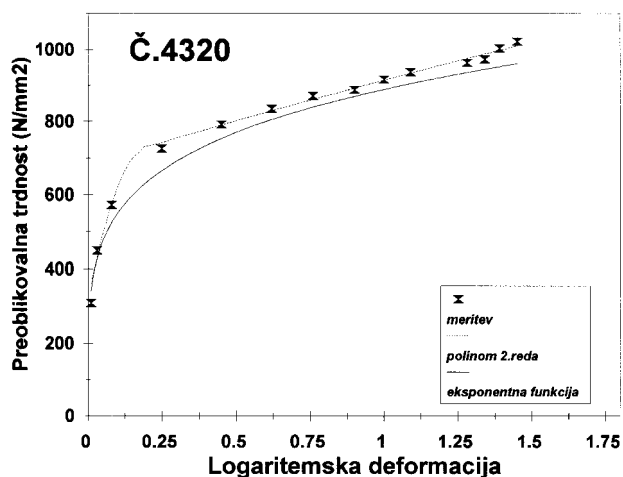
2.3 Ugotovitve

Iz prikazanih funkcijskih popisov preoblikovalnih trdnosti jekel in njihove primerjave z izmerjenimi - dejanskimi vrednostmi smo ugotovili, da eksponentna funkcija zelo slabo opisuje dejansko stanje preoblikovalnih trdnosti pri vseh vrstah preizku{anih jekel. Do velikih razlik med funkcijskimi in izmerjenimi vrednostmi pride predvsem pri ve- jih deformacijah jekel, pri katerih so funkcijske vrednosti v ve- ini primerov precej

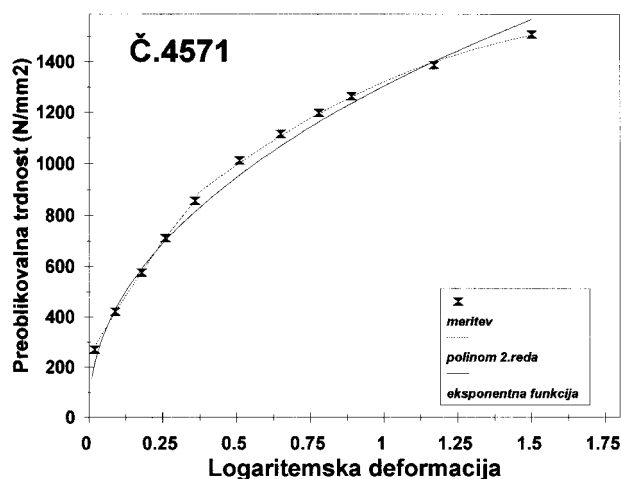


Slika 2: Krivulje te- enja za jeklo CK15 (^1221)

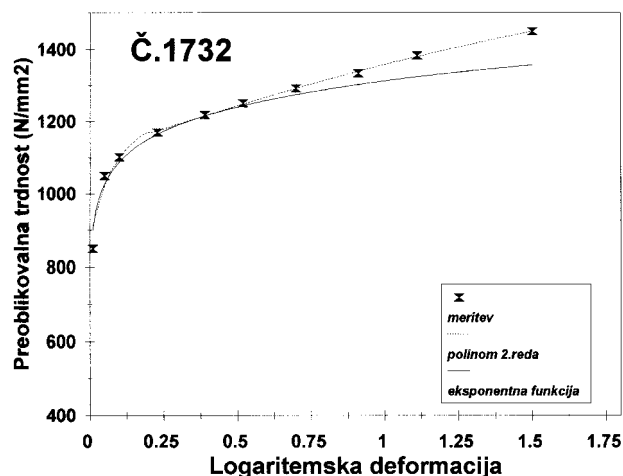
Figure 2: True stress - true strain curves of tested CK15 steel



Slika 3: Krivulje te-enja za jeklo 42CRMO4 (Č.4320)
Figure 3: True stress - true strain curves of tested 42CRMO4 steel



Slika 5: Krivulje te-enja za jeklo prokron 11 (Č.4571)
Figure 5: True stress - true strain curves of tested X12CRNI188 steel



Slika 4: Krivulje te-enja za jeklo CK60 (Č.1732)
Figure 4: True stress - true strain curves of tested CK60 steel

ni' je od dejanskih. Manjša razlika je pri majhnih deformacijah, pri katerih pa so funkcijske vrednosti ni' je ali pa višje.

Povsem druga-e je pri opisu preoblikovalnih trdnosti jekel z dvema polinomoma druge stopnje, pri katerem razlik med funkcijskimi in izmerjenimi vrednostmi ni, tako tudi pri nizkih kot visokih deformacijah jekel. Do manjšega odstopanja pride le v se-i{-u obeh polinomov, kar pa na natan-nost opisa preoblikovalnih trdnosti jekel z dvema polinomoma, pri nizkih in visokih deformacijah, katerih natan-no poznanje pri razvoju tehnologij preoblikovanja je velikega pomena, ne vpliva.

3 SKLEP

V delu smo predstavili rezultate raziskav, katerih osnovni cilj je bil izdelati računalniški program za opis

preoblikovalnih trdnosti jekel z matemati-nim modelom, ki bi -im boljše opisal dejansko deformacijsko stanje preoblikovanega jekla. Ugotovili smo, da lahko preoblikovalne trdnosti jekla zelo natan-no opišemo z dvema polinomoma druge stopnje, in to v celotnem podro-ju preoblikovalnosti jekel. Opis je nekoliko slabši v sti-i{-u obeh polinomov, kar pa uporabnost polinomov za prikaz preoblikovalnih trdnosti - krivulj te-enja jekel ne zmanjšuje. Druga-e je pri opisu preoblikovalnih trdnosti z eksponentno funkcijo, pri katerem pride do prevelikih razlik med funkcijskimi in dejanskimi preoblikovalnimi trdnostmi, zato uporabo eksponentne funkcije za opis krivulj te-enja jekel ne priporo-amo v primerih, ko lahko natan-no poznanje preoblikovalnih napetosti jekel odlo-ilno vpliva na uspešen potek dolo-enega preoblikovalnega procesa jekla, ali pa na nosilnost konstrukcije preoblikovalnih naprav.

4 LITERATURA

- Howard E. Boyer: Atlas of Stress-Strain Curves, ASTM International, Metals Park, Ohio 44073, 1987
- Ashby M. F.: Physical Modelling of Materials Problems, *Materials Science and Technology*, 8 (1992) 102-111
- B. Kosec, B. Arzenček: Izračun deformacijske trdnosti iz tlačnega preizkusa - Računalniški program, NTF & IMT, Ljubljana, 1992
- B. Arzenček, A. Kveder, K. Kuzman, M. [imnic, A. Lagoja, V. Poga-nik: Vpliv mazivnih snovi na hladno preoblikovanje jekel, *Poro-ila MI*, Ljubljana, 1979
- K. Kuzman, B. Arzenček: Maziva in koeficienti kontaktnega trenja pri masivnem preoblikovanju jekla v hladnem stanju, *BIAM 80*, Zagreb, Zbornik radova, 1980, 3-135 do 3-148
- Kosec B., Kosec F., Kosec L., Kampuž Z.: Matrix Deformation around Hard Phase Inclusion, EUROMAT'97, *Conference Proceedings*, Maastricht, 1, 1997, 545-548