

MAKROSKOPSKI MODELI DVOFAZNIH MATERIALOV

MACROSCOPIC MODELS OF TWO-PHASE MATERIALS

BORUT KOSEC¹, F. KOSEL²

¹Univerza v Ljubljani, NTF-OMM, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1998-03-09

Mikroskopskim pojavom deformacije dvofaznih materialov, toka snovi, začetku in širjenju razpok, gibanju porušeni delcev sekundarne faze v osnovni ali toku osnove med porušeni delci je in situ zelo težko slediti. V prispevku je prikazana rešitev tega problema z makroskopskimi modeli, ki so za nekaj velikostnih redov povečani v primeri z mikrostrukturnimi realnih materialov. Posamezne sestavine modela imajo lastnosti, ki so relativno zelo dobro primerljive z lastnostmi mikrostrukturnih sestavin realnih materialov. Izdelali smo dve vrsti modelov: prve, prirejene za deformacijo z nategom, druge pa za bolj kompleksen način deformacije z valjanjem.

Ključne besede: dvofazni material, matrica, vključek, neporušne preiskave, numerična simulacija

Microscopic phenomena of the deformation of the two-phase materials, the material flow, the formation and propagation of cracks, motion of broken particles of the secondary phase in the matrix or of the matrix flow in situ is very difficult to be traced. The solution of that problem is presented by macroscopic models enlarged to some orders of magnitude in comparison to the microstructure of real materials. The properties of single model components are relatively very well comparable to those of the real materials. Two types of models have been made: the first one considering the tensile deformation, and another one considering more complex way of the rolling deformation.

Key words: two-phase material, matrix, inclusion, non-destructive testing, numerical simulation

1 UVOD

Pojavi deformacije ter porušitve večfaznih materialov so eno najbolj zanimivih vprašanj, s katerimi se ukvarja strokovna literatura s področja nauka o materialih¹⁻⁵. To vprašanje je pomembno tako zaradi samih mehanskih in uporabnih lastnosti teh materialov, kakor tudi zaradi njihovega vedenja med procesi predelave ter obdelave z različnimi postopki strojniških tehnologij.

Orodja, s katerimi razpolaga fizikalna metalurgija oziroma "material science", ne zmorejo na mikroskopskem nivoju brez porušitve odkrivati dogodke v notranjosti materialov⁶. To je bil osnovni razlog, da smo skušali z makroskopskimi modeli dvofaznega materiala, z neporušitvenimi metodami in matematičnim modeliranjem opisati dogodke znotraj dvofaznega materiala med plastično deformacijo⁷⁻¹⁰. Zato smo izdelali modela, v katerih je velikost elementov, ki imajo vlogo matrice in delcev sekundarne faze 10^2 do 10^3 -krat večja od njihove normalne velikosti v večfaznih materialih. S primerno kombinacijo materialov, oblike in razporeda sestavin modela, načina deformacije ter ustrezne neporušne preiskovalne metode, ki omogoča opazovanje modela po posameznih stopnjah deformacije, nam je uspelo dobiti sliko o zaporedju pojavov pri deformaciji dvofaznih materialov.

2 PREGLED MATEMATIČNIH TEORIJ IN MODELOV

V strokovni literaturi je opisanih več matematičnih teorij in modelov, ki na različne načine obravnavajo

napetostno - deformacijsko stanje v dvofaznih materialih¹¹. Za modeliranje vedenja dvofaznih materialov med procesom deformacije so bili doslej v praksi uporabljani predvsem naslednji trije:

- Teorija zaostalega striga ("shear - lag theory"), pri kateri je vedenje dvofaznega materiala med procesom deformacije popisano s prenosom obremenitve z matrice na sekundarno fazo preko strižnih napetosti na mejni površini.
- Druga teorija je t.i. Eshelby-eva ali teorija "srednjih vrednosti"¹², ki obravnava mehansko vedenje materialov, utrjenih s togimi vključki elipsoidne oblike. Teorija temelji na predpostavki, da je plastična deformacija v celotni matrici konstantna, zato ta teorija ni sposobna dati podatkov o lokalnem napetostno - deformacijskem stanju v matrici in sekundarni fazi.
- Tretji način, ki je danes največkrat uporabljen za modeliranje dvofaznih materialov, je analiza z metodo končnih elementov (MKE)¹³. Tu je dvofazni material obravnavan kot makromehanski kontinuum, in vplivi mikrostrukture niso vključeni. Metoda vsebuje modeliranje dvofaznega materiala kot dveh ločenih materialov, z različnimi snovnimi lastnostmi, povezanih le preko mejne površine.

Sodobna teorija preučevanja napetostno - deformacijskih stanj v dvofaznih materialih pa temelji na kombinaciji Eshelby-eve teorije ekvivalentnega vključka in analize z metodo končnih elementov.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Za preslikavo in povečavo pojavov v mikrostrukturi v makroskopski svet smo izbrali dve obliki modelov: prvo prirejeno za deformacijo z nategom, drugo pa za bolj kompleksen način deformacije z valjanjem.

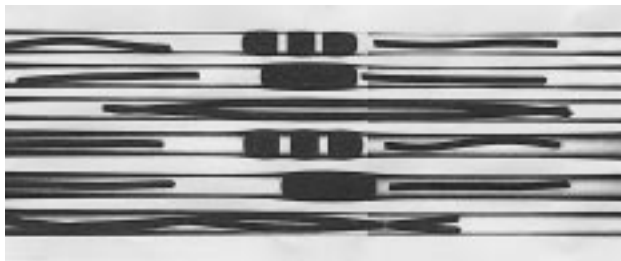
3.1 Model za enoosni natezni preizkus

Prvi model je sestavljen iz kovinske cevi in vložkov ter je prirejen za natezni preizkus. V tem modelu ima stena cevi vlogo matrice, vložki pa vlogo sekundarnih faz. Model omogoča opazovanje deformacije stene cevi ob vložkih.

Cevi so iz zelo duktilnih kovin ali zlitin (baker, med, avstenitno jeklo), ki so zato tudi primerno toplotno obdelane (žarjene in gašene). Vložki pa so iz mnogo bolj togega materiala (maloogljično in orodno jeklo). Dejanskim razmeram bi bolj ustrezali oziroma bili ekvivalentni vložki iz keramike (npr. oksidi, karbidi) ali intermetalnih spojin. Razen težav, ki bi si jih naložili z oblikovanjem vložkov iz teh materialov, v kvalitativnem niti v kvantitativnem merilu ne bi ničesar pridobili. Razmerja v osnovnih mehanskih lastnostih sestavin modela (modul elastičnosti, meja plastičnosti, manj pa trdnosti, trdoti in pa duktilnosti) izbranih materialov so primerna in dovolj velika.

Vložki so cilindrični in na konceh zaobljeni. Vedenje porušeni vključkov sekundarnih faz smo v modelu posnemali s sestavljenimi vložki. Praktično je iz prej povedanega zelo težko sestaviti model z vložki ob izbranih materialih cevi, ki bi se med obremenjevanjem oziroma deformacijo porušili, ne da bi se cev prej pretirano deformirala ali celo porušila. Sestavljeni vložki so bili iz po treh delov različnih dolžin. Zunanja dva dela sta bila kroglasto zaobljena, notranje mejne površine med deli vložkov pa so bile ravne. Modele smo sestavili tako, da smo po en ali več vložkov vstavili v sredino (srednji del) cevi, v del, ki se vpne v čeljusti stroja za natezni preizkus, pa smo vstavili vložke, da se cev pri vpetju ne bi poškodovala.

Natezne preizkuse smo naredili na univerzalnem statično - dinamičnem preizkuševalnem stroju INSTRON 1255. Vsak model smo na preizkuševalnem stroju obre-



Slika 1: Deformirane cevi iz nerjavnega avstenitnega jekla brez vložkov in z njimi. Obremenitev cevi je do F_{max} . Ločitev delov sestavljenih vložkov, deformacija stene cevi. Radiografija

Figure 1: Deformed tubes made by stainless austenitic steel with and without inserts. Loading of tubes is up to F_{max} . Separation of the parts of the assembled inserts; deformation of the tube wall. Radiography

menjevali do največje obremenitve (F_{max}). Merili smo podaljšek (razteg) modela (matrice - cevi). Zunanje mere modelov smo premerili na karakterističnih mestih z natančnostjo 0,01 mm. Na značilnih radialnih in vzdolžnih prerezih pa smo izmerili tudi spremembe debeline stene (z natančnostjo $\pm 5 \mu m$) in trdote po steni cevi.

Vložki so bili izdelani z majhno podmero glede na notranji prerez cevi zato, da smo model sploh lahko sestavili. Razdalje med vložki smo kontrolirali in zadržali z distančniki, ki na preizkus niso imeli nobenega vpliva. Tesen kontakt med vložki in cevjo se vzpostavi po majhni plastični deformaciji cevi. Deli sestavljenih vložkov se med deformacijo ločijo in med njimi nastanejo votline. Če je povezava med vložkom in cevjo tesna, nastane v teh votlinah podtlak (teoretično, vakuum). Zračni tlak bi lahko dodatno vplival na deformacijo tega dela cevi. Vpliv tega pojava smo ocenili z modeli, v katerih so bili vložki po osi prevrtani in se je tlak v nastalih votlinah ves čas izenačeval z zunanjim. Zaradi izvrtin se praktična togost vložkov ni opazno zmanjšala.

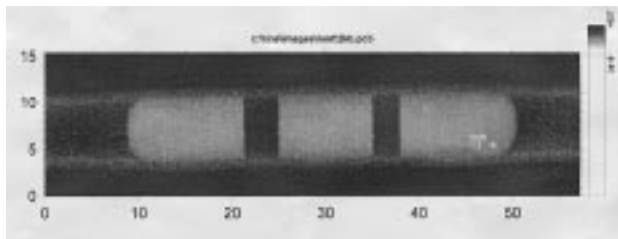
Modele smo pred nateznim preizkusom in po njem presvetlili z rentgensko svetlobo, žarki γ ali z nevtroni za kontrolo položaja vložkov in njihovih sestavnih delov ter potek materiala stene cevi.

Cevi smo preiskali z neporušitveno radiografsko metodo z rentgenskim aparatom Scanray pri anodni napetosti 170 kV, času ekspozicije 4 minute in razdalji izvira žarkov od vzorcev 70 cm. Uporabili smo film FUJI 1x100 in folijo (Pb) debeline 0,125 mm. Za slikanje z γ žarki smo uporabili izotop (Co^{60}).

Nevtronografija pa je bila opravljena pri naslednjih pogojih: tok nevtronov $1,4 \times 10^7$ nevtronov/cm², čas ekspozicije je bil približno 60 sekund, posneto pa na slikovne plošče FUJI Photo Film IP - ND 34 oziroma IP - ND 35.

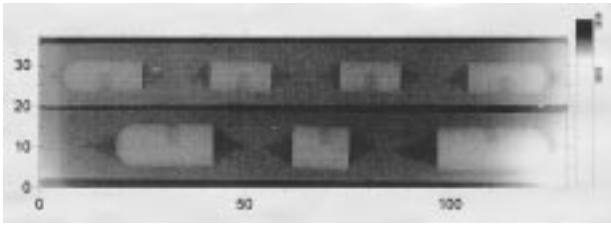
3.2 Model za preizkus z valjanjem

Druga oblika modelov je prirejena za deformacijo z valjanjem. Modeli so bili uliti v jekleno kokilo dimenzij 200 x 50 x 40 mm tako, da je zgornja ploskev, ki je pri valjanju v stiku z valjem, nastala s prostim strjevanjem. Zato smo z mehansko obdelavo odstranili napake, nas-



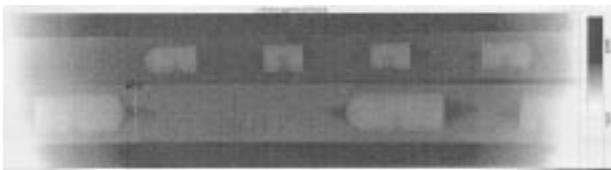
Slika 2: Ločeni deli vložka v deformirani bakreni cevi. Nevtronografija. Povečava pribl. 2,25 -krat

Figure 2: Separated parts of the insert in the deformed copper tube. Neutronography. Magnification approx. 2.25x



Slika 3: Nevtronografija valjanega bloka iz zlitine ZnCuTi z jeklenimi vložki cilindrične oblike; spodaj Z2, zgoraj Z1. Povečava pribl. 1,2-krat

Figure 3: Neutronography of rolled ingot made by the ZnCuTi alloy with cylindrical steel inserts. Z2 below, Z1 above. Magnification approx. 1.2x

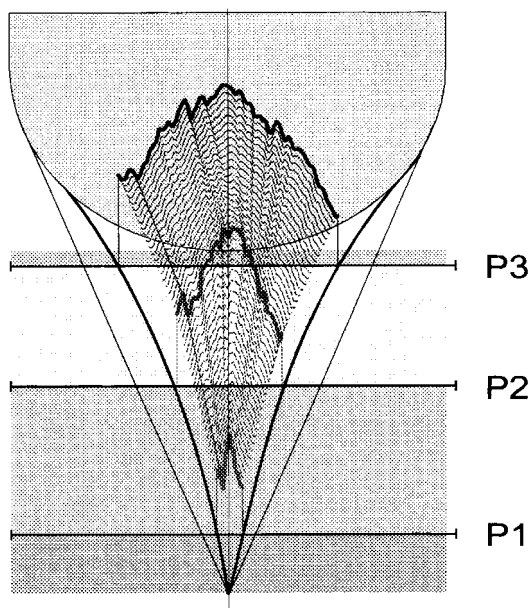


Slika 4: Nevtronografija delov deformiranih modelov Z z lego profila za analizo oblike votline

Figure 4: Neutronography of the deformed parts of Z models with the profil position for the analysis of the void geometry

tale med strjevanjem, in jo zravnali tako, da je bila paralelna s spodnjo osnovno ploskvijo. Zaradi različne velikosti napak smo odstranili različno debele plasti. Zato so bili modeli na začetku različne debeline. Sestavljene vložke smo pred litjem mehansko pritrdili, da se med litjem in strjevanjem niso premaknili.

Vložki so bili iz relejnega oziroma hitroreznega jekla. Kovinska matrica je pri modelih S iz zlitine SnPb4Sb1, pri modelih Z pa iz zlitine ZnCuTi (pribl. 0,6% Cu in



Slika 5: Profili P1, P2 in P3 skozi votlino na prostem zaobljenem delu vložka, prikazanem na **sliki 4**

Figure 5: Profiles P1, P2 and P3 through the void at the spherical part of the insert presented in **Figure 4**

0,14% Ti). Zlitini sta dobro livni in preoblikovalni v toplem in hladnem. Za mikrostrukturne preiskave pa sta primerni zato, ker vsebujeta sekundarne faze, ki dobro označijo tok materiala. Modele smo na valjalnem stroju SCHMITZ valjali pri temperaturah 300°C (Z) in 150°C (S) v več prehodih s povprečno redukcijo višine 1 mm na prehod. Po eni vmesni in po končni redukciji smo modele presvetlili z rentgenskimi ali žarki γ ter z nevtroni, da bi ugotavljali spremembe položaja delov vložkov, položaj in obliko votlin in tok kovinske matrice. Nekatere od nevtronografskih slik smo analizirali tudi z analizatorjem slike. Uporabili smo program TINA 2.09e, Raytest Isotropenmessegärate GmbH. Analiza nevtronografske slike omogoča informacijo o notranjih prostih površinah matrice, nastale pri zapolnjevanju votlin.

Primer ilustriramo z dvema sestavljenima vložkoma iz modelov Z1 in Z2 po deformaciji 53,8 oziroma 35,5%, ko so se votline med ločenimi deli vložkov v veliki meri že zapolnile. Na **sliki 3** sta prikazani projekciji dela modelov z ločenimi deli vložkov.

Modeli za preizkus deformacije z valjanjem so v primeri s prvimi makroskopsko manj "transparentni", saj se vsi dogodki znotraj njih odkrijejo le z neporušno preiskavo, seveda pa lahko za nekatere preizkuse tudi s porušitveno preiskavo.

So pa ti modeli mnogo bližji, če že ne enaki dejanskim materialom, katerih osnovne in sekundarne faze so za dva do tri velikostne rede povečane. Na modelih se lahko sledi ločitev porušenih delov prvotnega večjega vložka, rast votlin in zaporedje v zapolnjevanju por, ki sta skupen, sočasen proces.

4 NUMERIČNO MODELIRANJE

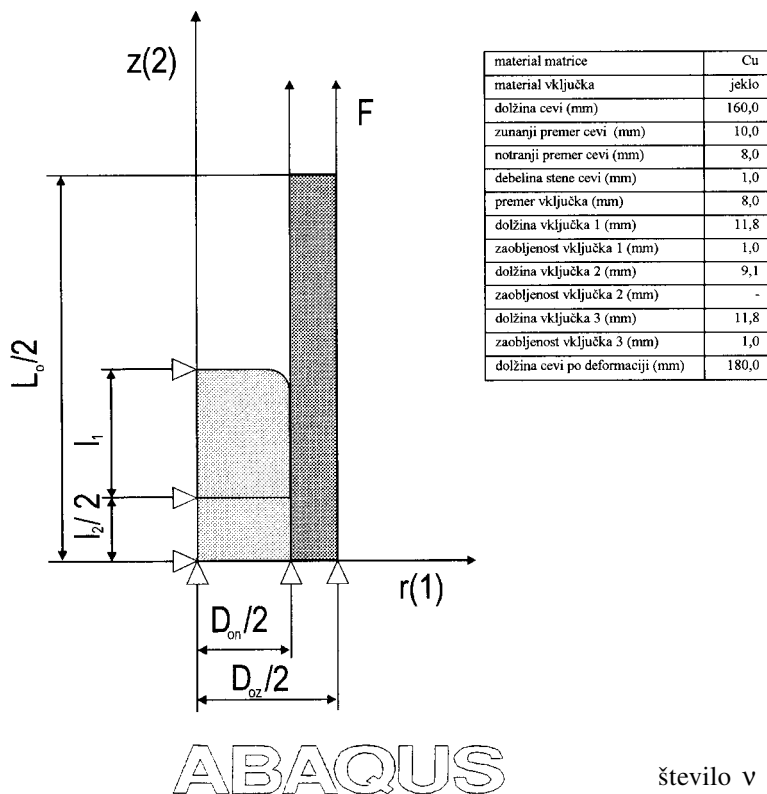
Numerično modeliranje procesa deformacije makroskopskih modelov dvofaznih materialov je bilo izdelano z metodo končnih elementov (MKE), z uporabniškim programom ABAQUS na delovni postaji HP 9000 Apollo Series 720.

Uporabniški program ABAQUS je eden izmed najbolj uporabnih in uveljavljenih komercialnih programov za reševanje problemov s področja preoblikovanja in deformacije materialov z metodo končnih elementov. Posebno primeren je za reševanje rotacijsko simetričnih problemov.

Vhodni podatki za analizo z metodo končnih elementov vsebujejo informacije o:

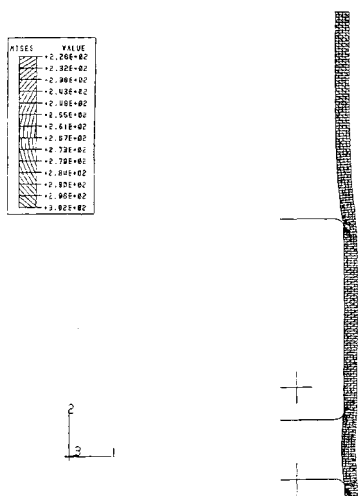
- geometrijskih parametrov (geometrija modela sistema matrica - vključek)
- mehanskih lastnosti posameznih komponent (modul elastičnosti, Poissonovo število in krivulja plastičnosti)
- začetnih in robnih pogojih in
- obremenitvah.

Pri opisu modela je pomemben podatek tudi definiranje kontaktnih lastnosti med matrico in vključki sekundarne faze.



Slika 6: Eksperimentalni model uporabljen za numerično analizo

Figure 6: Eksperimental model used for numerical analysis



Slika 7: Von Misesova ekvivalentna napetost v matrici pri 12,5% deformaciji (MISES (N/mm²))

Figure 7: Von Mises equivalent stress in the matrix at 12.5% deformation (MISES (N/mm²))

Za numerično modeliranje so bili uporabljeni parametri eksperimentalno izvedenih makroskopskih modelov dvofaznih materialov. Vse upoštevane mehanske lastnosti uporabljenih materialov smo ugotovili na osnovi enosnega nateznega preizkusa (na preizkuševalnem stroju INSTRON 1255) oziroma smo jih privzeli na osnovi podatkov iz strokovne literature^{14,15}.

Za matrico simuliranega modela, prikazanega na slikah 6 in 7, smo izbrali bakreno cev, katere modul elastičnosti je imel vrednost $E = 119,0$ GPa, Poissonovo

število ν pa je bilo enako 0,343. Krivuljo plastičnosti materiala matrice (bakrene cevi) smo popisali s polinomom tretjega reda:

$$\sigma = A + B \cdot \phi + C \cdot \phi^2 + D \cdot \phi^3,$$

kjer imajo eksperimentalno dobljene napetostne konstante A, B, C in D naslednje vrednosti: $A = 51,33$ MPa, $B = 1468,39$ MPa, $C = -2285,49$ MPa in $D = 1330,88$ MPa.

Matrice simuliranih modelov so bile modelirane z elementi tipa CAX4; mejna površina z elementi tipa IRS21A; vključki pa so bili modelirani kot absolutno toga telesa. Koeficient trenja pa je bil v vseh primerih privzet kot konstantna vrednost ($\mu = 0,1$).

Osnovni namen modela, prikazanega na sliki 6, je bil prikazati tok materiala matrice pri ločitvi sestavljenega vložka, ki pomeni potovanje razpokanega vključka pod vplivom natezne obremenitve, in pa določitev napetostno - deformacijskega stanja v njej.

Na začetku preizkusa so bili vključki tesno skupaj (v neposrednem stiku). Pod vplivom natezne obremenitve pa so se premaknili v smeri delovanja zunanje sile, kar je privedlo do pojava praznin med cilindričnimi vključki, ki so se pričele zapolnjevati z duktilnim materialom matrice (cevi).

5 SKLEPI

Osnovni namen naše raziskave je bila postavitvev usreznega makroskopskega modela dvofaznega materiala, ki bi ga bilo mogoče tako eksperimentalno kot tudi računalniško simulirati. Bistvo povezane eksperimentalne analize in numeričnega modeliranja procesa deformacije dvofaznega materiala je v opazovanju spremi-

njanja toka snovi, začetku in širjenju razpok, gibanju delcev sekundarne faze v osnovi ali toku osnove med porušenimi delci ter analizi napetostno - deformacijskega stanja.

Pri deformaciji heterogenih večfaznih materialov pridejo do izraza mehanske lastnosti posameznih sestavin materiala. To se najbolj pozna, ko je stopnja plastične deformacije velika in se sistem približuje porušitvi.

Spremembo geometrijskih parametrov smo opazovali tudi in situ s presevanjem makroskopskih modelov z rentgensko svetlobo, žarki γ in nevtroni. Po tej poti se lahko zelo dobro spremljajo spremembe v geometriji heterogene faze in toka osnove.

Numerične simulacije deformacijskega procesa makroskopskih modelov dvofaznih materialov so bile izdelane z metodo končnih elementov (MKE), z uporabniškim programom ABAQUS. Dale so parametrične vrednosti nekaterih procesnih spremenljivk, ki jih z eksperimenti ni mogoče dobiti.

Naša raziskava kaže, da je moč pojav plastične deformacije dvofaznega (večfaznega) materiala zelo dobro opazovati na makroskopskih modelih, sestavljenih iz elementov, ki imajo mikrostrukturnim sestavinam podobne lastnosti. Modela, ki smo ju sestavili, se da v praksi uporabiti tudi za kompozitne in njim podobne materiale.

6 LITERATURA

¹ Butcher B. R., Allen P. L.: Tensile Flow and Fracture of Large Inclusions, *Metal Science*, (1977) 462-470

² Hertzberg R. W.: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1976

³ Hayden H. V., Mofatt W. G., Wulf J.: The Structure and Properties of Materials; Volume III - Mechanical Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965

⁴ Lilholt H.: Hardening in two-phase materials - I.: Strength Contributions in Fibre-Reinforced Copper - Tungsten, *Acta Metall.*, 25 (1977) 571-585

⁵ Lilholt H.: Hardening in Two-phase Materials - II.: Plastic Strain and Mean Stress Hardening Rate, *Acta Metall.*, 25 (1977) 587-593

⁶ Ashby M. F.: Physical Modelling of Materials Problems, *Materials Science and Technology*, 8 (1992) 102-111

⁷ Halmshaw R.: Non - Destructive Testing, Edward Arnold, London, 1994

⁸ Kosec B., Rant J., Kosec L., Kaling M.: Neutron Radiography of Plastic Deformed Two Phase Alloys, *The 4th Int. Conference of Slovenian Society of Nondestructive Testing*, Conference Proceedings, Ljubljana, (1997) 167-174

⁹ Kosec B., Kosel F., Kosec L., Kampuš Z.: Matrix Deformation around Hard Phase Inclusion, *EUROMAT'97*, Conference Proceedings, 1, Maastricht, (1997) 545-548

¹⁰ Kosec B., Kosec L., Kosel F., Kampuš Z.: Plastic Deformation of Tubes with Rigid Inclusions, *ICIT'97*, Conference Proceedings, 1, Maribor, (1997) 137-140

¹¹ Alkins L. S., Gibeling C. J.: A Finite Element Model of the Effects of Primary Creep in an Al-SiC Metal Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A (1995) 3067-3079

¹² Eshelby J. D.: The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems, *Proc. R. Soc.*, A241 (1957) 376-396

¹³ Rao S. S.: The Finite Element Method in Engineering, Pergamon Press, London, 1989

¹⁴ Livschitz G. B.: Physikalische Eigenschaften der Metalle und Legierungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1989

¹⁵ Dies K.: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik, Springer Verlag, Berlin, 1967