

Analiza nastanka prsline mikromehanizmom žilavog loma u konstrukcionom čeliku

Mr Marko Rakin dipl.inž.¹⁾
Dr Zorica Cvijović dipl.inž.¹⁾
Dr Vencislav Grabulov dipl.inž.²⁾
Ivo Blačić dipl.inž.²⁾
Mr Milorad Zrilić dipl.inž.¹⁾
Dr Slaviša Putić dipl.inž.¹⁾

U radu je primenjen mikromehanički model zasnovan na posebnom kriterijumu plastičnog tečenja materijala. Nastanak prsline izazvan pojavom, rastom i spajanjem šupljina, analiziran je na osnovu ponašanja pri zatezanju glatke cilindrične epruvete izradene od čelika 22 NiMoCr 3 7. Ulazni podaci za proračun koji se odnose na zastupljenost i veličinu nemetalnih uključaka su određeni optičkom mikroskopijom. Dobijeni rezultati ukazuju da primenjeni mikromehanički model može da se koristi za karakterizaciju materijala i analizu pojave prsline u standardnoj epruveti izrađenoj od konstrukcionog čelika, a da je kvantitativna metalurška analiza neophodna za opis prve faze žilavog loma - nastanak šupljina.

Ključne reči: Žilav lom konstrukcionog čelika, mikromehanički modeli, kvantitativna metalografska analiza, metoda konačnih elemenata (MKE).

Uvod

MIKROMECHANIZAM žilavog loma većine metala i legura obuhvata nastanak, rast i spajanje šupljina. Pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja, šupljine nastaju oko čestica sekundarne faze i nemetalnih uključaka zbog nemogućnosti tih čestica da prate plastično deformisanje matrice, ili lomom pomenutih čestica, ako su izrazito krte ili velike. U materijalima čije su čestice, koje predstavljaju mesta pojave šupljina, čvrsto vezane za matricu materijala, rast šupljina je manje izražen. U materijalima izrazito plastičnog ponašanja, lom se javlja posle sve tri navedene faze - nastanka, rasta i spajanja šupljina [1].

Primena globalnih kriterijuma mehanike loma, kao što su COD i J-integral, u analizi nastanka žilavog loma, ne daje zadovoljavajuće rezultate za sve slučajeve spoljašnjeg opterećenja. Problemi su posebno izraženi pri pojavi velike plastične deformacije na vrhu prsline. Mikromehanički pristup je uveden s ciljem da se proces loma opiše na način koji, što je više moguće, odgovara stvarnim pojavama u materijalu. Takav pristup se zasniva na modelima kojima se tumači i kvantifikuje proces mikroskopskih oštećenja, a u cilju predviđanja makroskopskog otkaza. Da bi to moglo da se ostvari, neophodno je tačno definisati polja napona i deformacija na posmatranom mestu u strukturi, kao i vrednosti promenljivih koje dodatno opisuju oštećenje materijala (npr. zapreminski udeo šupljina).

Mikromehanički model, zasnovan na funkciji plastičnog tečenja, koji je formulisao Gurson [2] a dalje razvili Tvergard i Nidلمان [3,4], se u poslednjoj deceniji najviše koristi u analizi nastanka žilavog loma legura. Za razliku od

klasičnih kriterijuma tečenja (npr. Von Mizesov kriterijum koji se najčešće koristi kod metala), ustanovljeni kriterijum tečenja uvodi dodatnu promenljivu - zapreminski udeo šupljina (f). Eksperimentalna i numerička ispitivanja modifikovanog Gursonovog modela, poznatog kao GTN model (Gurson-Tvergard-Nidلمان), pokazuju da se razvoj oštećenja na mikroskopskom nivou i prirast plastične deformacije kao globalnog, makroparametra ponašanja materijala mogu dobro da opišu i izračunaju. Uprkos nedostacima modela koji pokušavaju da se prevaziđu sve većim brojem istraživanja [5, 6, 7, 11, 12], ocenjuje se mogućim predviđanje vrednosti makroskopske žilavosti loma na osnovu mikroskopskih istraživanja.

U ovom radu je izložen numerički proračun metodom konačnih elemenata (MKE) ponašanja cilindrične glatke epruvete pri zatezanju, urađen u okviru „round robin” projekta o primeni i razvoju mikromehaničkih modela [6], koji je organizovao Tehnički komitet za numeričke metode TC8 Evropskog društva za integritet konstrukcija (ESIS). Proračunom je određen kriterijum nastanka žilavog loma zasnovan na GTN modelu: kritični zapreminski udeo šupljine f_c . U program za proračun MKE je ugrađen kriterijum tečenja s dopunskom promenljivom - zapreminskim udelom šupljine f . Nastanak šupljina oko nemetalnih uključaka je metalografski kvantitativno analiziran.

Mikromehanizam žilavog loma u konstrukcionom čeliku

U konstrukcionim čelicima do žilavog loma najčešće

¹⁾ Tehnološko-metalurški fakultet, 11000 Beograd, Karnegijeva 4

²⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

dolazi posle pojave sve tri faze pojave: nastanka i rasta, prslina i spajanja šupljina. Veličina čestica sekundarne faze i nemetalnih uključaka potencijalnih mesta nastanka šupljina jeste od $0,01\mu\text{m}$ do vrednosti koje premašuju $1\mu\text{m}$ [8]. Njihov je oblik različit, od sfernog do lamelnog, a može da bude i nepravilan [9]. Zavisno od veličine, oblika i udela ovih čestica u ispitivanom čeliku, ustanovljeno je nekoliko modela kojima se može da opiše mikromehanizam nastanka šupljina. Svim do sada predloženim modelima je zajedničko, da šupljina nastaje kada se premaši tzv. kritični napon unutar uključka ili na graničnoj površini uključak-matrica materijala. Zavisno od preovlađujućeg tipa, kao i od oblika uključaka, oni će se ili izdvajati iz matrice zbog nemogućnosti da prate plastičnu deformaciju matrice, ili će se slomiti. Pravač ispitivanja takođe utiče na ovaj proces. Uočeno je [10] da se formiranje šupljine od uključaka MnS u čeliku A508 odvija različito u uzdužnom pravcu, kada se većina uključaka lomi, i u kratkom poprečnom pravcu, kada nastanak šupljine odgovara dekoheziji granične površine između čestica i matrice materijala.

U GTN modelu, nastanak šupljina se najčešće definiše pomoću početnog zapreminskog udela nemetalnih uključaka f_0 , kojim su određene tzv. primarne šupljine, i korišćenjem pojedinih modela koji mogu da kvantifikuju kasniji nastanak šupljina (sekundarne šupljine) tokom rasta primarnih šupljina pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja.

Rast šupljina zavisi od polja napona i deformacija. Model GTN se zasniva na pretpostavci da se nastanak i rast šupljina u metalu mogu makroskopski da opišu proširenjem klasičnog kriterijuma plastičnog tečenja, kako bi se uzeo u obzir uticaj poroznosti koja se javlja u materijalu [11], pa se zapreminski udeo šupljina f kao promenljiva unosi u izraz za plastični potencijal [2,3]:

$$\phi = \frac{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}{2\sigma^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma}\right) - [1 + (q_1 f)^2] = 0 \quad (1)$$

gde σ označava trenutni napon tečenja matrice materijala, σ'_{ij} je devijatorski deo tenzora napona, σ_m je srednji (hidrostatički) napon, a parametar q_1 je uveo Tvergard [3] da bi prvobitni Gursonov kriterijum tečenja više odgovarao stvarnim pojavama u materijalu koji se plastično deformišu. Prema ovom modelu, plastično tečenje poroznog materijala ne zavisi samo od ekvivalentne plastične deformacije ϵ_{eq}^p matrice materijala, već i od zapreminskog udela šupljina f i srednjeg napona σ_m .

Prema izrazu (1), očigledno je da materijal gubi svoju nosivost ako f dostigne vrednost $1/q_1$. Ranije istraživanje [12] je pokazalo, da čak i kada je $q_1=1,5$, vrednost $f=1/q_1$ je velika da bi realno mogla da opiše pojave pri lomu materijala. Zbog toga je umesto promenljive f , u izraz (1) uvedena promenljiva f^* [4]. Na taj način je uzet u obzir uticaj poslednje faze žilavog loma - spajanja šupljina, koje dovodi do gubitka nosivosti materijala:

$$f^* = \begin{cases} f & \text{za } f \leq f_c \\ f_c + K(f - f_c) & \text{za } f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

f_c je kritična vrednost zapreminskog udela šupljina pri kojoj dolazi do spajanja šupljina. Parametar K definiše nagib završnog dela krive na dijagramu sila - smanjenje prečnika epruvete i često se označava kao „faktor ubrzanja”. Parametar K se može odrediti na osnovu zapreminskog udela šupljina pri završnom lomu f_F (koji se određuje

eksperimentalno) i na osnovu vrednosti f_c i $f_u^*=1/q_1$:

$$K = \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} \quad (3)$$

Zapreminski udeo šupljina f , kao promenljiva ugrađen u procesorski proračun MKE prema GTN modelu, zavisi od rasta postojećih šupljina i nastanka novih - sekundarnih šupljina:

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{nastanka}} + \dot{f}_{\text{rasta}} \quad (4)$$

$$\dot{f}_{\text{nastanka}} = A \epsilon_{eq}^p \quad (5)$$

$$\dot{f}_{\text{rasta}} = (1-f) \epsilon_{ii}^p \quad (6)$$

gde je ϵ_{ii}^p plastični deo tenzora brzine deformacije. Ču i Nidلمان su pretpostavili da nastanak sekundarnih šupljina sledi normalnu raspodelu [13]:

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_{eq}^p - \epsilon_N}{S_N}\right)^2\right] \quad (7)$$

gde je f_N zapreminski udeo šupljina čestica oko kojih nastaju sekundarne šupljine, ϵ_N je srednja deformacija pri nastanku šupljine i S_N je odgovarajuće standardno odstupanje.

Za zakon tečenja se podrazumeva da prati makroskopski uslov normalnosti:

$$\epsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

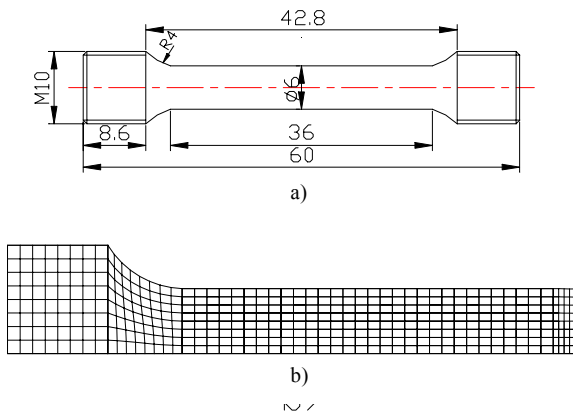
gde je λ nenegativni parametar plastičnosti, jer je $\sigma_{ij} \epsilon_{ij}^p \geq 0$.

Kriterijum nastanka prslina - određivanje kritične vrednosti parametra oštećenja

Identifikacija i određivanje mikromehaničkih parametara je složen postupak, koji čine eksperimenti i numerički proračuni. U okviru „round robin” projekta TC8, koji se posebno odnosio na primenu i razvoj numeričkog aspekta mikromehaničkog modeliranja, urađen je numerički proračun zatezanja (u više koraka) standardne glatke cilindrične epruvete (sl.1a) radi karakterizacije materijala i određivanja kritične vrednosti parametra oštećenja f_c , koja odgovara nastanku prslina u epruveti. Ulazni podaci su dobijeni eksperimentalno, zatezanjem epruveta prečnika $\phi 6$, izrađenih od čelika 22 NiMoCr 3 7 na temperaturi 0°C [6].

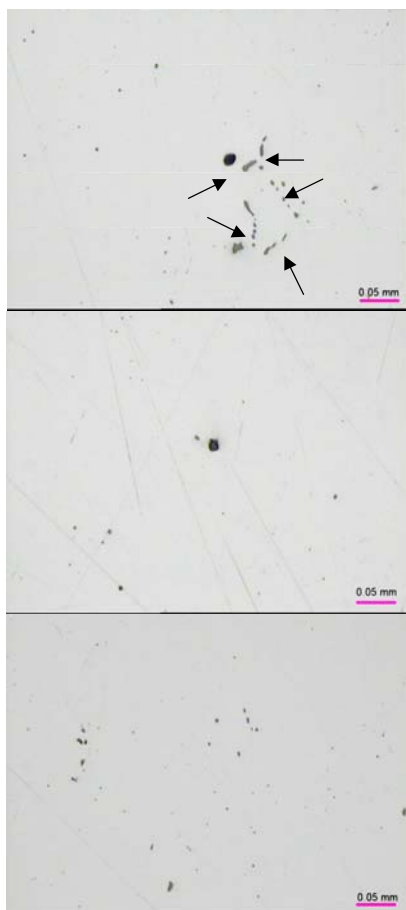
Radi simetrije je modelirana samo jedna četvrtina epruvete (sl.1b). Sličan model je korišćen i u radu [14]. Korišćeni su izoparametarski četvorougaooni osmočvorni konačni elementi sa redukovanom integracijom (2x2). Primenjena je analiza velikih deformacija korigovanim postupkom Lagranža. Nelinearnost materijala je modelirana pomoću krive stvarni napon - stvarna deformacija, koja je određena delom eksperimentalno (za manje deformacije), delom ekstrapolacijom (za veće deformacije) uz primenu Bridžmanove korekcije usled nastanka vrata na epruveti. Plastično tečenje je definisano GTN kriterijumom tečenja sa izotropnim ojačavanjem. Kriterijum spajanja šupljina

(donji deo izraza 2) nije bio ugrađen u konstitutivne jednačine. Spoljašnje opterećenje je uvedeno preko zadatih pomeranja ivice epruvete.



Slika 1. Cilindrična glatka epruveta: a) dimenzije, b) mreža konačnih elemenata

Početni uslov, podatak za početni zapreminski udeo šupljina f_0 , je određen kvantitativnom optičkom mikroskopijom. Na sl.2 su prikazane fotografije tri vidna polja na uzorku ispitivanog materijala.



Slika 2. Tri vidna polja nemetalnih uključaka, dobijena pod optičkim mikroskopom

Na vidnom polju gore jasno se vidi grupa sulfida i jedan veliki oksid. Vidno polje u sredini sadrži takođe jedan veći oksid. Vidna polja u sredini i dole upućuju na zaključke, da se radi o dosta čistom čeliku. Na gore prikazanom vidnom polju su strelicama obeležena mesta verovatnog nastanka šupljina. S obzirom na grupisanost uključaka, očekivano je

da spajanje šupljina na tim mestima može dovesti do nastanka prsline, u slučaju da je troosnost naponskog stanja velika.

Početni zapreminski udeo šupljina $f_0 = 0,00226$ je određen kao srednja vrednost površinskog udela nemetalnih uključaka za sva vidna polja. Za planimetrijski postupak određivanja zapreminskog udela nemetalnih uključaka je primenjena poluautomatska metoda merenja. O crtavanju profila uključaka i određivanje površinskog udela za svako vidno polje je rešeno softverski, uz pomoć računara. Klasiranje uključaka je obavio operator sa iskustvom u kvantitativnoj metalurškoj analizi. Pri tome su vidna polja uzimana po redu, tako da je obuhvaćena cela površina pripremljenog uzorka. Detalji primenjenog postupka su dati u [15-17].

Dobijena vrednost za početni zapreminski udeo šupljina znatno premašuje vrednosti koje se mogu da odrede pomoću formule Franklina [18]:

$$f_0 = 0.054 \left[S(\%) - \frac{0.001}{Mn(\%)} \right] \quad (9)$$

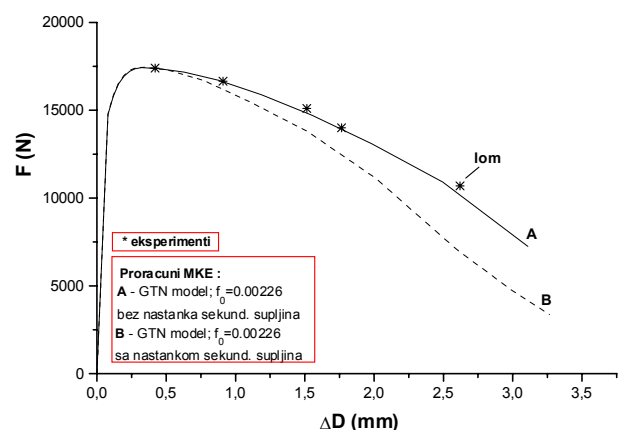
prema kojoj je $f_0 = 0,00052$, uzimajući u obzir hemijski sastav čelika (tabela 1). U ovom slučaju su, međutim, uzeti u obzir samo MnS uključci. Stoga je za dalji rad, kao relevantna, uzeta vrednost za početni zapreminski udeo šupljina određena kvantitativnom analizom.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanog čelika

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,30	0,23	0,71	0,09	0,011	0,47	0,80	0,71

Elastično-plastični proračun MKE je urađen za vrednost parametra $q_I = 1,5$, prema [3], u dve varijante: uzimanjem u obzir nastanka sekundarnih šupljina i bez toga. Pri nastanku sekundarnih šupljina parametar A, prema modelu Ču-Nidلمان, je određen za $\varepsilon_N = 0,3$, $S_N = 0,1$ i $f_N = 0,04$. Ovo su najčešće korišćene vrednosti za čelik u [7, 11, 12].

Na sl.3 je prikazan dijagram sila - smanjenje poprečnog preseka na mestu pojave vrata na epruveti.

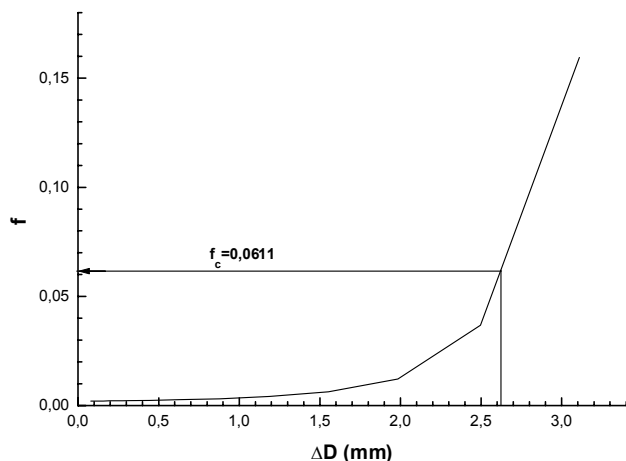


Slika 3. Sila F, u zavisnosti od smanjenja prečnika epruvete ΔD

Dobijeno je dobro slaganje s eksperimentalnim tačkama numerički dobijenih rezultata sa početnom vrednosti f_0 i bez uzimanja u obzir nastanka sekundarnih šupljina, a značajno odstupanje kada se uticaj sekundarnih šupljina uzima u obzir. Odstupanje po Ču-Nidلمانovom modelu verovatno je posledica vrednosti usvojenog parametra f_N , jer kod nastanka sekundarnih jamica dolazi do dodatne lokalizacije

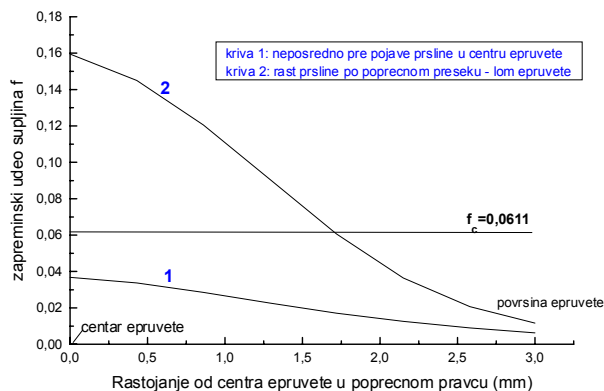
deformacije u smicajne trake i smanjenja aktivne zapremine u odnosu na aktivnu zapreminu pri nastanku primarnih šupljina, što upućuje na pretpostavku da bi parametar f_N trebalo da ima manju vrednost za ispitivani čelik. Takođe, pri nastanku sekundarnih šupljina aktivne su male čestice, veličine približno $1\ \mu\text{m}$ i manje, što ide u prilog smanjivanju parametra f_N .

Kritični zapreminski udeo šupljina f_c je određen prema dijagramu prikazanom na sl.4.



Slika 4. Rast zapreminskog udela šupljina f u centru epruvete

Dijagram predstavlja rast zapreminskog udela šupljina f u konačnom elementu u centru epruvete, gde su za f dobijene najveće vrednosti, i gde je trebalo očekivati da će da nastane prslina. Promena zapreminskog udela šupljina f po najmanjem poprečnom preseku koji odgovara mestu pojave vrata na epruveti je data za poslednja dva koraka proračuna ponašanja pri zatezanju (sl.5). Kriva 1 je određena neposredno pre pojave prsline u centru epruvete (pretposlednji korak zatezanja); kriva 2 je određena kada se epruveta već slomila (poslednji korak zatezanja). Slika 5 jasno prikazuje da u centru epruvete parametar oštećenja materijala dostiže najveće vrednosti. Ovo je očekivano jer je na tom mestu najviše izražena troosnost naponskog stanja.



Slika 5. Promena zapreminskog udela šupljina f po poprečnom preseku epruvete na mestu pojave vrata

Krive na slikama 4 i 5 su formirane na osnovu srednjih vrednosti za zapreminski udeo šupljina f u četiri Gausove tačke za konačni element u centru epruvete i konačne elemente u zoni najmanjeg poprečnog preseka epruvete. Da bi se odredila kritična vrednost f_c , koja odgovara početku spajanja šupljina i pojavi prsline, korišćena je

eksperimentalna vrednost [6] za suženje u momentu naglog pada sile na dijagramu F- ΔD : $\Delta D \approx 2,63\text{mm}$. Dobijena vrednost se dobro slaže sa preporučenim vrednostima [5, 6] za ovaj čelik ($f_c=0,05$) i za čelik koji mu je po hemijskom sastavu i mehaničkim osobinama sličan, A508 C1.2 ($f_c=0,045$) [19].

Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata, može da se zaključi sledeće:

- numerički dobijeni rezultati ponašanja cilindrične epruvete pri zatezanju primenom GTN modela i eksperimentalne vrednosti se dobro slažu; pokazano je da se nastanak sekundarnih šupljina prema predloženim vrednostima parametara modela Ču-Nidman ne može da predstavi;
- početna vrednost za zapreminski udeo šupljina f_0 , određena kvantitativnom metalografskom analizom pokazala se odgovarajućom;
- dobijena vrednost za kritični zapreminski udeo šupljina koji odgovara nastanku prsline, f_c , je u skladu sa ranije dobijenim rezultatima i preporukama.

Naredni deo istraživanja koji je u toku, obuhvata verifikaciju dobijene vrednosti za f_c u analizi početka rasta prsline na geometrijama s početnom prslinom. Cilj istraživanja je da se predvidi rast postojeće prsline i modelira njen stabilan rast, poznavajući ponašanje jednostavnih geometrija bez prslina pri zatezanju. J-R krive bi se formirale određivanjem J integrala jednim od standardnih metoda, dok bi rast prsline Δa bio određen numerički, primenom parametra f_c prethodno određenog ispitivanjem epruvete bez početne prsline prema postupku opisanom u ovom radu.

Literatura

- [1] ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics*, CRC Press, London, 1995.
- [2] GURSON, A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, vol.99, p.2-15.
- [3] TVERGAARD, V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions, *International Journal of Fracture*, 1981, vol.17, p.389-407.
- [4] TVERGAARD, V. Needleman A. Analysis of Cupe-Cone Fracture in a Round Tensile Bar. *Acta Metallurgica*, 1984, vol.32, p.157-169.
- [5] BROCKS, W. Numerical round robin on micro-mechanical models - Results, IWM-Bericht T 8/95, Fraunhofer Insitut Werkstoffmechanik, Freiburg, 1995.
- [6] BERNAUER, G., Brocks, W. Numerical round robin on micro-mechanical models - Results, ESIS TC8, Institute for Materials Research - GKSS Research Center, Geesthacht, 2000.
- [7] SUN, D.-Z., SIEGELE, D., VOSS, B., SCHMITT, W. Application of Local Damage Models to the Numerical Analysis of Ductile Fracture. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1989, vol.12, p.201-213.
- [8] THOMASON, P.F. *Ductile Fracture of Metals*. Pergamon Press, Oxford, 1990.
- [9] ARGON, A.S., IM J. Separation of Second Phase Particles in Spheroidized 1045 Steel. *Metallurgical Transactions*, 1975, vol.6A, p.839-852.
- [10] BEREMIN, F.M. Cavity Formation from Inclusions in Ductile Fracture of A508 Steel. *Metallurgical Transactions*, 1981, vol.12A, p.723-731.
- [11] ZHANG, Z.L. A Sensitivity of Material Parameters for the Gurson Constitutive Model. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1996, vol.19, p.561-570.
- [12] ZHANG, Z.L., NIEMI, E. Studies on the Ductility Predictions by Different Local Failure Criteria, *Engineering. Fracture Mechanics*, 1994, vol.48, p.529-540.

- [13] CHU,C.C., NEEDLEMAN,A. Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets, *Journal of Engineering and Materials Technology*, 1980, vol.102, p.249-256.
- [14] RAKIN,M., at all... Numerical Simulation of Ductile Fracture Initiation by Application of Rice-Tracey Void Growth Model, *Proceedings of the ECF 13 Fracture Mechanics: Applications and Challenges*, M. Fuentes et al. (Eds.), ESIS Publication, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2000 printed on CD.
- [15] UNDERWOOD,E.E. *Quantitative Metallography*. ASM Handbook, ASM International, 1986, p.123-134.
- [16] CVJIJOVIĆ,Z. *Kvalitativna i kvantitativna metalografska analiza uticaja železa, mangana i hroma na fazni sastav livene Al-Zn-Mg-Cu legure*. Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1987.
- [17] *Standard Practice for Determining Inclusion Content of Steel and Other Metals by Automatic Image Analysis*, ASTM Standard E 1245-89, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.
- [18] FRANKLIN,A.G. Comparison Between a Quantitative Microscope and Chemical Methods for Assessment of non-metallic Inclusions, *Journal of Iron and Steel Inst.*, 1969, vol.207, p.181-186.
- [19] SUN,D-Z., KIENZLER,R., VOSS,B, SCHMITT,W. *Application of Micromechanical Models to the Prediction of Ductile Fracture*. Fracture Mechanics - Twenty - Second Symposium. ASTM STP 1131, Atluri S.N., Newman J.C., Raju Jr.I., Epstein J.S. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, vol.II, p.368-378.

Rad primljen: 22.12.2000.god.

