

ODREĐIVANJE C* INTEGRALA PRIMENOM EPRI PROCEDURE

C* INTEGRAL EVALUATION BY USING EPRI PROCEDURE

Naučni rad / Scientific paper

UDK /UDC: 624.042.6:620.16

Rad primljen / Paper received: 5.7.2002.

Adresa autora / Author's address:

⁽¹⁾ Mašinski fakultet, 27. marta 80, Beograd

⁽²⁾ 138 Powell Lane, Upper Darby, PA 19082, USA

⁽³⁾ Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd

Ključne reči

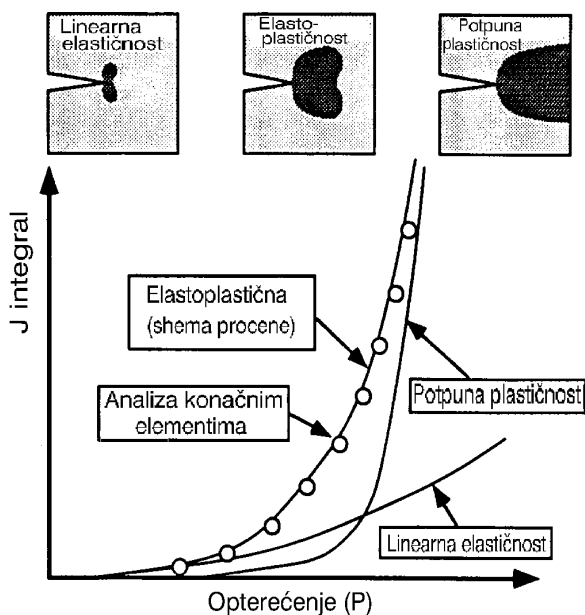
C* integral
viskoplastično ponašanje
EPRI procedura
visokotemperaturne komponente

IZVOD

U radu je opisana EPRI procedura određivanja parametara elasto-plastične mehanike loma. Na osnovu analogije visko-plastičnog problema sa opisanom procedurom, analizirana je mogućnost primene EPRI procedure na probleme stacionarnog puzanja. Data su dva primera primene tako formulisane procedure, oba za cilindrične cevi na visokoj temperaturi, od kojih je jedna opterećena unutrašnjim pritiskom, a druga aksijalnim silama. Za cev pod unutrašnjim pritiskom, sproveden je odgovarajući proračun C* integrala.

UVOD - EPRI PROCEDURA

Inženjerska procedura EPRI sadrži analitička rešenja za J-integral, otvaranje usta prsline δ (CMOD) i pomeranje napadne tačke sile, u oblasti elasto-plastičnog ponašanja materijala, za neke standardne epruvete i za cilindre sa podužnom ili obimskom prslinom, koja se dobijaju kao kombinacija rešenja u elastičnom i potpuno plastičnom domenu, sl. 1 [1].



Slika 1. Približno analitičko rešenje u domenu elasto-plastičnosti

Keywords

C* integral
EPRI procedure
visco-plastic behaviour
high-temperature components

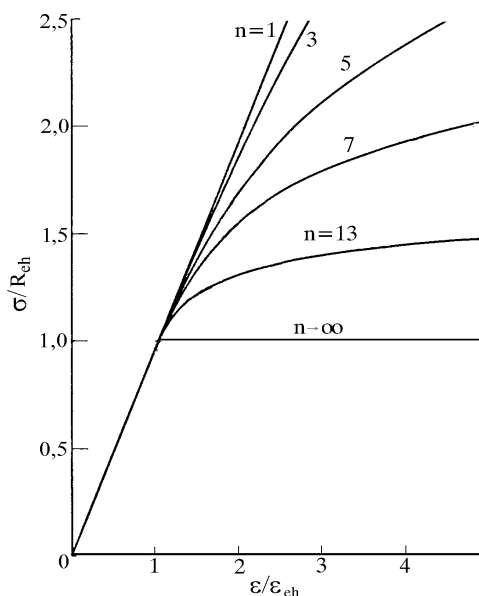
ABSTRACT

The EPRI procedure for evaluation of elastic-plastic fracture mechanics parameters has been described. Using an analogy of visco-plastic problem with a described procedure, the possibility of application of EPRI procedure to the stationary creep problems has been analysed. Two examples of application of such a procedure have been presented, both for cylindrical pipes at high temperature, one under internal pressure, and the other one loaded by axial forces. Pipe under internal pressure was used for the C* integral evaluation.

Ponašanje materijala se definiše Ramberg-Osgudovom relacijom, sl. 2:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

gde je σ_0 [MPa] napon tečenja, ε_0 [-] deformacija tečenja, $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$, E [MPa] modul elastičnosti, α i n bezdimenzioni parametri deformacionog ojačavanja, koji se određuju procedurom definisanom u [2].



Slika 2. Ramberg-Osgudova relacija

Plastična komponenta J integrala se dobija rešavanjem HRR polja po J [2]:

$$J_p = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 I_n r \left(\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} \right)^{n+1} \sigma_{ij}^{n+1} \quad (2)$$

gde je I_n integraciona konstanta koja zavisi od parametri deformacionog ojačanja n , r i θ polarne koordinate oko vrha prsline, a σ_{ij} bezdimenziona funkcija od n i θ .

Na osnovu činjenice da lokalni naponi moraju da rastu proporcionalno udaljenom opterećenju P , sledi:

$$J_p = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 h L \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} \quad (3)$$

gde je h bezdimenziona funkcija geometrije i koeficijenta ojačavanja n , L karakteristična dimenzija, a P_0 granično opterećenje, pri kome nastaje plastični kolaps, odnosno popuštanje (tečenje) neto preseka. Parametri L i P_0 se određuju u zavisnosti od geometrije, dok je h određeno numeričkom analizom i dato u odgovarajućim tabelama EPRI priručnika [1]. Imajući u vidu analogna rešenja za plastične komponente otvaranja usta prsline (v_p) i pomeranje napadne tačke (Δ_p), u opštem slučaju važi:

$$J_p = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 c h_1 \left(\frac{a}{b}, n \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1}$$

$$V_p = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 c h_2 \left(\frac{a}{b}, n \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (4)$$

$$\Delta_p = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 c h_3 \left(\frac{a}{b}, n \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)^n$$

gde je c dužina ligamenta, a dužina prsline, b širina epruvete, $c = b - a$, a h_1 , h_2 i h_3 su bezdimenzione funkcije geometrije i eksponenta ojačavanja n , date u [1]. Za CTOD ne postoje rešenja, već se koriste formule koje povezuju CTOD (δ) i J , kao npr.

$$\delta = d_n \frac{J}{\sigma_0} \quad (5)$$

gde je d_n parametar koji zavisi od svojstava materijala i naponskog stanja, sl. 3.

Imajući u vidu činjenicu da elastična komponenta J_e mora da bude srazmerna P^2 dobija se:

$$J_{el} = \frac{K_I^2}{E} = \frac{P^2 f^2(a/W)}{B^2 W E} \quad (6)$$

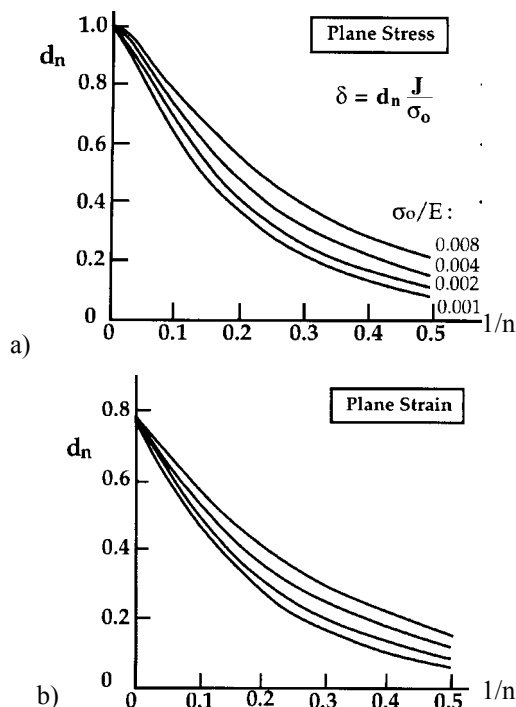
Kao merodavna dužina prsline često se uzima efektivna dužina prsline, a_{ef} , koja je određena modifikovanom Irvinovom korekciji zone plastičnosti:

$$a_{ef} = a + \frac{1}{1 + (P/P_0)^2} \frac{1}{\beta \pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \quad (7)$$

gde je $\beta=2$ za ravno stanje napona (RSN) i $\beta=6$ za ravno stanje deformacije (RSD).

Korekcija plastične zone koja se primenjuje na J_e nema teorijsku osnovu, ali je uvedena da bi se dobio gladak prelaz sa linearno elastičnog na potpuno plastično ponašanje, sl. 1. Dobijene vrednosti za J , koje obuhvataju korekciju plastične zone, bliže su rezultatima elastično-plastičnih proračuna, dobijenih metodom konačnih elemenata. Ovaj uti-

caj je skoro zanemarljiv pri malim opterećenjima, kada je ponašanje linearno elastično, i pri velikim opterećenjima, kada dominira potpuno plastično ponašanje.



Slika 3. Zavisnost parametar d_n od koeficijenta ojačavanja n za a) ravno stanje napona b) ravno stanje deformacije

Osnovna prednost EPRI procedure je uzimanje u obzir ojačavanja materijala u plastičnoj oblasti. Šta više, primenom tzv. modela referentnog napona [2], moguće je ugraditi i ponašanje materijala sa izraženim tečenjem. S druge strane, delimično prolazne prsline nisu uzete u obzir, što je najveća mana ove procedure.

Procedura EPRI je detaljno analizirana u radu [3], gde je posebna pažnja posvećena interpolaciji i ekstrapolaciji ulaznih i izlaznih veličina. Na osnovu detaljne analize izvedeni su sledeći zaključci:

- Linearna interpolacija količnika a/b često nije dovoljno tačna, što može da se prevaziđe normiranjem opterećenja, čime se dobija kontinuitet rešenja u zavisnosti od a/b .
- Za n može da se koristi linearna interpolacija, ali se ekstrapolacija van granica $1 < n < 20$ ne preporučuje.
- Kombinovanjem napona tečenja i ometene deformacije može da se izbegne interpolacija rešenja za RSN i RSD, koja je inače moguća jedino ako se zna stvarna vrednost kritične sile.

PRIMENA EPRI PROCEDURE NA STACIONARNO PUZANJE

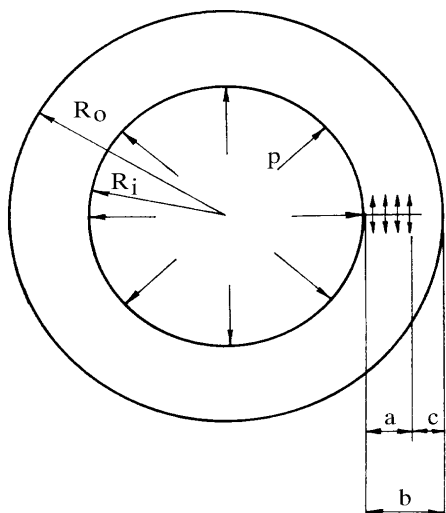
Puzanje je pojava rastuće deformacije visokopterećenih komponenti koje rade na povišenim temperaturama u dužem vremenskom periodu, kao što su parovodi, rotori i loatice parnih turbina. S obzirom na vrstu opterećenja i radne uslove, materijali ovih komponenti su vrlo osetljivi na pojavu i rast prsline, što može da dovede do lomova sa katastrofalnim posledicama.

Postoji veliki broj radova koji su posvećeni vremenski zavisnoj mehanici loma, i posebno integralima nezavisnim od putanje. Tako je još 1976. godine formulisan C^* integral, kao parametar mehanike loma u oblasti stacionarnog puzanja, analogan J integralu [4]. Imajući u vidu pomenutu analogiju, C^* je jednak brzini oslobađanja brzine energije i predstavlja jačinu naponskog polja i polja brzine deformacije oko vrha prsline. Dominantnost sekundarnog puzanja je bitno ograničenje C^* integrala, tako da njegova osnovna svojstva, pa ni nezavisnost od putanje, ne važe ukoliko elastične i trenutne plastične deformacije i/ili primarno puzanje mogu da se zanemare. Međutim, ovaj rad je prvenstveno usmeren ka problemima u domenu plastičnosti gde sekundarno puzanje dominira, tako da se sva svojstva C^* integrala zadržavaju.

Imajući u vidu analogiju koja postoji između sekundarnog puzanja i plastičnog ponašanja materijala, ne predstavlja iznenađenje da je prvi parametar vremenski zavisne mehanike loma, C^* integral, uveden kao potpuno analogan J integralu.

Određivanje J integrala je definisano po EPRI priručniku, koji obuhvata nekoliko jednostavnih geometrija (CT epruveta, ploča sa ivičnom ili središnjom prslinom, cilindar sa obimskom ili podužnom prslinom). Kako se u ovom radu analizira parovod, odnosno cilindrična cev, razmatrane su dve varijante koje pokriva EPRI procedura:

1. Cilindar sa unutrašnjom aksijalnom prslinom pod dejstvom unutrašnjeg pritiska, sl. 4.
2. Cilindar sa unutrašnjom obimskom prslinom pod dejstvom aksijalnog opterećenja, sl. 5.



Slika 4. Cilindar sa unutrašnjom aksijalnom prslinom pod dejstvom unutrašnjeg pritiska

Prema EPRI proceduri izraz za J integral u domenu potpune plastičnosti je dat kao:

$$J = \alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot \sigma_0 \cdot c \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \cdot h_1(a/b, n, R_i/R_o) \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{n+1} \quad (8)$$

gde je a dužina prsline, b debljina cilindričnog zida, $c=b-a$ preostali ligament, $h_1(a/b, n, R_i/R_o)$ bezdimenzioni koeficijent zavisan od geometrije i varijante, R_i i R_o unutrašnji i spoljni prečnik, redom, $R_c=R_i+a$; radijalno rastojanje vrha prsline od ose

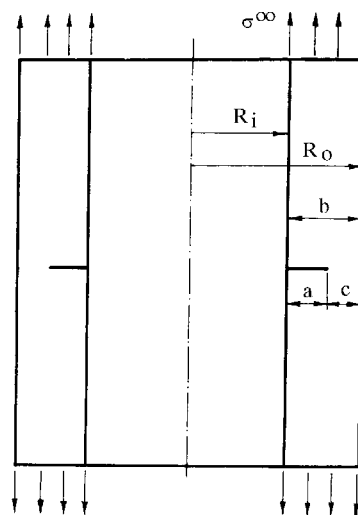
cilindra, p opterećenje (pritisak ili sila), p_0 granično opterećenje za slučaj idealne plastičnosti, različit za dve analizirane varijante:

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{c\sigma_0}{R_c}$$

za cilindar sa unutrašnjom aksijalnom prslinom pod dejstvom unutrašnjeg pritiska,

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \pi (R_o^2 - R_c^2)$$

za cilindar sa unutrašnjom obimskom prslinom pod dejstvom aksijalnog opterećenja.



Slika 5. Cilindar sa unutrašnjom obimskom prslinom pod dejstvom aksijalnog opterećenja

PRORAČUN PREOSTALOG VEKA

Za određivanje preostalog veka koristi se stepeni zakon rasta prsline u obliku:

$$\frac{da}{dt} = B \cdot (C^*)^m \quad (9)$$

gde su: B , m karakteristike materijala. Nakon zamene C^* sa izvedom J integrala po vremenu dobija se jednačina

$$\frac{da}{dt} = B \cdot \left(\frac{dJ}{dt}\right)^m \quad (10)$$

koja nije pogodna za rešavanje, pa se zato dJ/dt proširuje diferencijalom porasta prsline nakon čega se dobija jednačina

$$\frac{da}{dt} = B \cdot \left(\frac{dJ}{da} \cdot \frac{da}{dt}\right)^m \quad (11)$$

Posle određenih transformacija dobija se jednačina koja je pogodna za integraciju:

$$\frac{da}{1 - m \sqrt[m]{B \cdot \left(\frac{dJ}{da}\right)^m}} = dt \quad (12)$$

Tok proračuna može da se podeli u tri faze: Prvo, na osnovu dijagrama sila-pomeranje, odnosno napon-deformacija, odrede se σ_0 , ε_0 , α i n , iz jednačine (1). Takođe, u ovoj

fazi iz dijagrama $da/dt-C^*$, u skladu sa jednačinom (9) određuje se parametri B i m . Drugo, za poznato opterećenje, koje treba birati tako da se postigne plastičnost ($p/p_0 \geq 1$), odredi se vrednost J integrala. Na osnovu različitih vrednosti dužine prslina može da se odredi zavisnost J integrala od dužinu prslina. Treća, finalna faza je integracija jednačine (12) i dobijanje vremenskog perioda potrebnog za porast dužine prslina između dva koraka integracije.

U ovom radu je urađeno četiri proračuna, za dve varijante opterećenja cevi i za dva materijala. Što se tiče materijala uzeti su podaci za materijal koji nije bio u eksploataciji (ovde kraće nazvan "novi" materijal) i materijal koji je bio u eksploataciji ("stari" materijal) [5].

Ulazni podaci i rezultati

Za sva četiri proračuna sledeći ulazni podaci su isti: početna dužina prslina, $a_0 = 0,25$ mm, inkrement porasta dužine prslina, $\Delta a = 0,5$ mm, unutrašnji prečnik cevi, $R_i = 91,5$ mm, debljina cevi $b = 18$ mm.

Podaci za "novi" materijal su:

$\alpha = 1,128$, $\varepsilon_0 = 1,685(e-3)$, $\sigma_0 = 262,8$ MPa, $n = 9,8382$,
 $B = 2,56(e-3)$, $m = 0,75$,
 pri čemu se da/dt dobija u [mm/s], C^* u [N/(mm·s)].

Podaci za "stari" materijal su:

$\alpha = 2,08$, $\varepsilon_0 = 1,66(e-3)$, $\sigma_0 = 259$ MPa, $n = 7,98$,
 $B = 1,03(e-3)$, $m = 0,73$.

Treba napomenuti da su podaci iz jedn. (8) dobijeni na osnovu podataka iz rada [5], za temperaturu eksploatacije 540°C, pri čemu je modul elastičnosti $E = 1,56(e+5)$ MPa.

Rezultati proračuna preostalog veka za varijantu 1 (cilindar sa unutrašnjom aksijalnom prslinom pod dejstvom unutrašnjeg pritiska) za "novi" i "stari" materijal prikazani su u tab. 1. i tab. 2. Rezultati proračuna preostalog veka za varijantu 2 (cilindar sa unutrašnjom obimskom prslinom pod dejstvom aksijalnom opterećenja) za "novi" i "stari" materijal prikazani su u tab. 3 i tab. 4.

Tabela 1. Varijanta 1, "nov" materijal, $p=60$ MPa $p/p_0=1.03/2.63$

a [mm]	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75
t [h]	2154	2877	3133	3227	3263	3277	3282	3284	3285

Tabela 2. Varijanta 1. "star" materijal $p=60$ MPa $p/p_0=1.02/2.596$

a [mm]	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75
t [h]	763	937	980	992	995	996	996

Tabela 3. Varijanta 2. "nov" materijal $F=3.5$ MPa $p/p_0=1.04/2.27$

a [mm]	0,75	1,75	2,75	3,75	4,75	5,25	5,75
t [h]	5802	9638	10466	10650	10690	10695	10698

Tabela 4. Varijanta 2. "star" materijal $F=3.5$ MPa $p/p_0=1.02/2.24$

a [mm]	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75
t [h]	1910	2562	2793	2877	2909	2921	2925	2927	2928

ZAKLJUČCI

Na osnovu prikazanih rezultata može da se zaključi sledeće:

- EPRI procedura je veoma efikasno inženjersko oruđe za određivanje parametara mehanike loma visokotemperaturnih komponenti jednostavnog geometrijskog oblika u uslovima stacionarnog puzanja, kao što je C* integral, koji može dalje da se primeni na procenu njihovog preostalog veka.
- Preostali vek bitno zavisi od početne dužine prslina i svojstava, odnosno stanja materijala.
- Za komponente kompleksnijeg geometrijskog oblika i/ili nonstacionarno puzanje neophodna je primena numeričkih metoda, npr. metoda konačnih elemenata, da bi se odredili odgovarajući parametri mehanike loma.

NAPOMENA

Realizaciju ovog rada podržalo je Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije, preko projekata br. 1793 (S. Damljanović, A. Sedmak) i 1252 (N. Trišović).

LITERATURA

1. Shih, C.F., German, M.D. and Kumar, V., An Engineering Approach for Examining Crack Growth and Stability of Flawed Structure, EPRI Report NP-1931, EPRI, Palo Alto, 1981.
2. Anderson, T.L., Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, CRC Press, USA, 1994.
3. Nikolić, M., Inženjerski proračun parametara elasto-plastične mehanike loma, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1995.
4. Begley, J.A., Landes, J.D., The J integral as a Fracture Criterion, ASTM STP 514, ASTM, Philadelphia, str. 1-20, 1972.
5. Grujić, B., Identifikacija kvaliteta i pouzdanosti materijala izloženog puzanju u termoenergetskim postrojenjima, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2000.