

OCENA DINAMIČKE J-R KRIVE POMOĆU ŠARPI EPRUVETE SA PRSLINOM

DYNAMIC J-R CURVE EVALUATION APPLYING PRE-CRACKED CHARPY SPECIMEN

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 620.178.7

Rad primljen / Paper received: 15.1.2002.

Adresa autora / Author's address:

⁽¹⁾ Vojno-tehnički institut, Beograd

⁽²⁾ Imperial College of Science, Technology and Medicine, London

⁽³⁾ Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Ključne reči

- instrumentirano ispitivanje po Šarpiju
- Šarpi epruveta sa prslinom
- kriva otpornosti prema prslini
- merenje dužine prsline
- pad potencijala
- kriva opterećenje - pomeranje napadne tačke
- statičko opterećenje
- udarno opterećenje

IZVOD

U radu su predstavljeni rezultati određivanja statičke i dinamičke J-R krive pomoću dve metode sa jednom epruvetom, primenom Šarpi epruvete sa prslinom, izrađenom od HSLA čelika napona tečenja 700 MPa. Prva metoda koristi pad potencijala za merenje dužine prsline, primenjen na epruvetu sa neprekidnom rastom prsline (SSPD). Vrednost J-integrala je izračunata za odgovarajuću dužinu prsline podelom dijagrama u sekcije, primenom pogodne kalibracije. Druga metoda je zasnovana na uslovu nepromenljivog ugla savijanja epruvete SE(B) sa zarezom i konstantnog stanja napona u ligamentu tokom plastičnog rasta prsline.

Statička i dinamička kriva otpornosti su izvedene iz istih osnovnih dijagrama, dobijenih standardnim ispitivanjem faktora intenziteta napona (ASTM E1737) i na instrumentiranom Šarpi klatnu. Primenjeni su SSPD metoda i novo predložena metoda za konstrukciju R-krive, zasnovana na konstantnom odnosu dužine ligamenta i opterećenja (PLLL metoda). Statičke J-R krive, dobijene SSPD i PLLL metodom se slažu međusobno, kao i sa osnovnom krivom, dobijenom ASTM E1737 metodom sa više epruveta. Dinamička J-R kriva, dobijena SSPD metodom je daleko iznad statičkih krivih, dok je u početnoj zoni neznatno iznad u slučaju PLLL metode za rast prsline do 1,3 mm.

Prednost predložene nove metode za ocenu dinamičke J-R krive je u korišćenju jedne epruvete sa neprekidno rastućom prslinom, ali bez dodatnih zahteva za merenje rasta prsline. Ovo daje mogućnost primene na materijale heterogene mikrostrukture, npr. na zavarene spojeve.

UVOD

Komponente i konstrukcije su često izložene udarnom opterećenju. Podaci o materijalu, koji su dobijeni na osnovu ispitivanja u uslovima statičkog opterećenja, nisu dovoljni pri analizi ponašanja materijala u uslovima dinamičkog

Keywords

- instrumented Charpy test
- pre-cracked Charpy specimen
- crack resistance curve
- crack length measurement
- potential drop
- load vs. load line displacement curve
- static load
- impact load

ABSTRACT

The paper presents results of evaluating static and dynamic J-R curves using two methods of single specimen, applying pre-cracked Charpy specimens, produced of 700 MPa yield strength HSLA steel class. The first method uses potential drop applied to continuously cracked single specimen for crack length measurement (SSPD). The value of J integral was calculated for corresponding crack length by dividing the diagram into sections, using suitable calibration. The second method is based on the condition of non-variable bend angle of single edge notch SE(B) specimen and constant ligament net stress state during ductile crack growth.

Static and dynamic resistance curves are designed based on the same basic diagrams, obtained in standard stress intensity factor test (ASTM E1737) and on instrumented Charpy pendulum. SSPD method and new proposed R-curve design procedure, based on constant relation between ligament length and load (PLLL method) have been applied. Static J-R curves, obtained by SSPD and PLLL method are in agreement mutually and with master curve, obtained by ASTM E1737 multispecimen method. Dynamic J-R curve, obtained by SSPD method is clearly above static curves, and only slightly above them in the case of PLLL method up to 1.3 mm of crack extension.

The advantage of new proposed method for evaluating dynamic J-R curve is in use of single continuously cracked specimen, but without additional requirement for crack growth measurement. This opens the possibility for application to materials with microstructural heterogeneity, e.g. welded joints.

opterećenja. Stoga je razumljiva potreba za određivanjem otpornosti nastanku i rastu prsline pri savijanju udarnim opterećenjem pomoću dinamičke J-R krive. Danas su dostupne različite tehnike određivanja dinamičke R-krive, kao što su R-kriva dobijena pri ravnoj deformaciji, Čiperfildova

kriva ograničenog rasta prsline, ključne krive i tehnika slobodnog pada [1, 2]. Metoda više epruveta se ne može primeniti kada se ispituju nehomogeni materijali, npr. zavarjeni spojevi, zbog toga što je nemoguće postaviti vrh prsline u istu mikrostrukturu. Ovo se može rešiti primenom metode sa jednom epruvetom, koju su razmatrali Mak Gilivri [3] i Grabulov [4]. Oni su predložili tehniku ocene dinamičke R-krive pomoću pada potencijala podešenog da prati dužinu prsline. Ova tehnika je primenjena na epruvetu sa neprekidnim rastom prsline (single specimen potential drop method - SSPD). Obećavajući rezultati su dobijeni i primenom tehnike jedne epruvete na HSLA čelike metodom ocene R-krive na Šarpijevom klatnu [4].

Na osnovu uslova nepromenljivog ugla pri savijanju epruvete, zarezane samo sa jedne strane, tip SE(B), stanja napona u ligamentu tokom rasta duboke prsline [5] i konstantnog neto napona u ligamentu [6], predložena je nova metoda konstruisanja R-krive. Isti dijagrami, dobijeni na instrumentiranom Šarpi klatnu, su korišćeni u SSPD metodi i u novo predloženoj metodi konstruisanja R-krive iz proporcionalnosti dužine ligamenta i opterećenja (proportional ligament length and load method - PLLL), za statičke, kao i dinamičke krive otpornosti.

KRIVA OTPORNOSTI DOBIJENA METODOM PADA POTENCIJALA

Ispitivanje jedne epruvete radi određivanja J-R krive (zavisnost $J-\Delta a$) se može primeniti ako su ispunjeni uslovi za pouzdano i precizno određivanje rasta prsline. Stečeno iskustvo [7] je pokazalo da je pad potencijala pouzdana metoda merenja trenutne dužine prsline, koja se može koristiti u standardnim ispitivanjima parametara mehanike loma, a istovremeno daje podatke o zavisnosti sile i pomeranja. Položaj epruvete u kolu jednosmerne (DC) ili naizmenične struje (AC) je prikazan na sl. 1. Omogućeno je istovremeno zapisivanje veličine pada potencijala. Rezultujući dijagrami se zatim koriste za izračunavanje niza tačaka zavisnosti J integrala i pada potencijala ($J-\Delta E$), sl. 2. Treba da se zabeleže preseki koordinata A, B, C, D, ...K u dijagramima sila (F) - pomeranje (f) u tačkama $F_A, F_B, F_C, \dots, F_K$ i u dijagramima zavisnosti pada potencijala i pomeranja u tačkama $\Delta E_A, \Delta E_B, \Delta E_C, \dots, \Delta E_K$. Kako površina ispod krive sila - pomeranje predstavlja ukupno oslobođenu energiju, dijagram je podeljen u veći broj segmenata radi izračunavanja trenutne oslobođene energije u uzastopnim tačkama $F_A, F_B, F_C, \dots, F_K$.

U tački A pomeranje odgovara sili F_A i ukupna oslobođena energija (U_A) jednaka je površini između tačaka 0-A- F_A :

$$U_A = \int_0^{f_A} F df \quad (1)$$

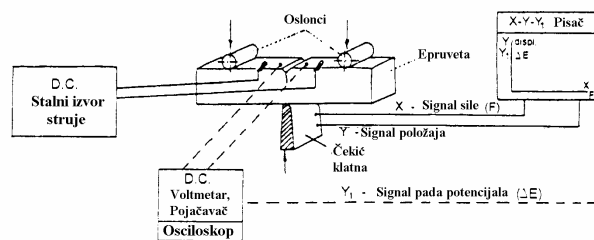
Vrednost J_A se potom izračunava zamenom veličine U_A , debljine epruvete B , širine epruvete W i dužine prsline a u jednačini:

$$J_A = \frac{2U_A}{B(W-a)} \quad (2)$$

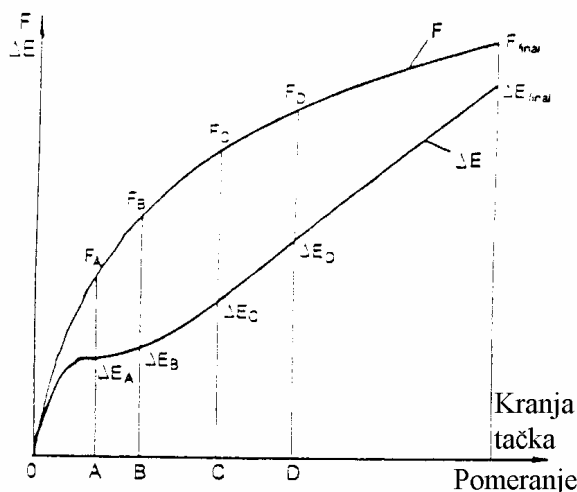
Za istu vrednost pomeranja u A dijagram na sl. 2. daje odgovarajuću vrednost pada potencijala ΔE_A . Dodatna kriva kalibracije $\Delta E-\Delta a$ (sl. 3) omogućava jednostavno određiva-

nje rasta prsline (Δa_A) za date vrednosti pomeranja u A. Kao rezultat, dobijen je prvi par vrednosti $J_A-\Delta a_A$ za konstrukciju krive otpornosti. Postupak se ponavlja za pomeranja u C, D, ..., K, kao što je opisano, dajući parove vrednosti $J_B-\Delta a_B, J_C-\Delta a_C, J_D-\Delta a_D, \dots, J_K-\Delta a_K$. Na taj način se ispitivanjem jedne epruvete dobija niz vrednosti $J_i-\Delta a_i$, što omogućava konstrukciju krive otpornosti.

Ovako dobijene vrednosti $J-\Delta a$ se mogu obraditi prema ASTM E 1737 radi valjanog izbora tačaka, da bi se odredila J-R kriva ispitane epruvete, ili R-kriva za ocenu regresione linije i kritične vrednosti J integrala (J_{Ic}).



Slika 1. Šema instrumentiranog klatna za merenje pada potencijala jednosmerne struje



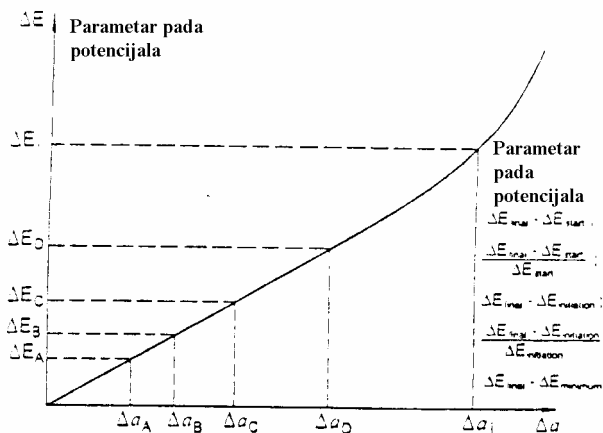
Slika 2. Postupak za određivanje $J-\Delta E$

KONSTRUKCIJA KRIVE OTPORNOSTI NA OSNOVU ZAVISNOSTI DUŽINE LIGAMENTA I OPTEREĆENJA

Poređenje dijagrama sila (F) - ugib (f), dobijenog iz odnosa opterećenje - vreme u Šarpi ispitivanju epruveta različite dubine i prečnika korena zarezaja je pokazalo da se dijagrami preklapaju u oblasti plastičnog rasta prsline (sl. 4), ukazujući na isto ponašanje prsline u ovoj oblasti. Za bolji uvid u ovaj odnos neophodno je izmeriti dužinu plastične prsline tokom rasta, bar približno. Pretpostavka da prsline počinju da rastu pri maksimalnom opterećenju nije dala prihvatljive rezultate. Sledeći pristup je zasnovan na ranijem iskustvu u određivanju dužine prsline, primenjenom u ispitivanju J integrala [8]. Osnovna pretpostavka ovog pristupa je da se ugao savijanja SE(B) uzorka ne menja u oblasti plastičnog rasta prsline [5], i da za konstantni neto napon u preseku

između kvadrata dužine ligamenta b^2 i sile F u ligamentu može da uspostavi sledeći odnos [6]:

$$b^2 = k \cdot F \tag{3}$$

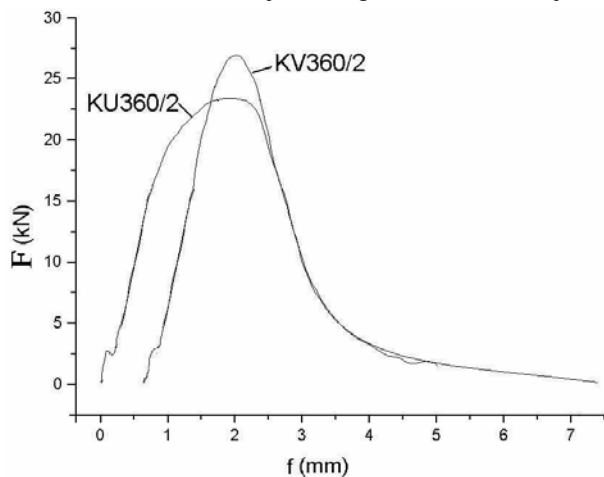


Slika 3. Kriva kalibracije zavisnosti pada potencijala i rasta prsline

Ovaj odnos se može koristiti za određivanje prirasta dužine prsline ako je koeficijent proporcionalnosti k poznat. Koeficijent k se može odrediti iz statičkih ispitivanja, na osnovu merenja konačne dužine prsline a_k i odgovarajuće sile F_k . Sledeća mogućnost je korišćenje $F - f$ odnosa (sl. 5) u oblasti plastičnog rasta prsline, posle tačke D, koji se može predstaviti u obliku:

$$F^{0.5} = A + B \cdot f \tag{4}$$

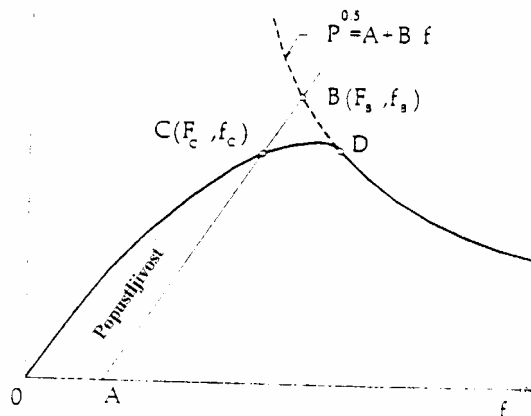
gde su A i B konstante, koje se mogu odrediti fitovanjem.



Slika 4. Poređenje zavisnosti sile F i ugiba f Šarpi epruveta sa V zarezom (KV 360-2) i sa U zarezom (KU 360-2)

U sledećoj proceduri odnos (4) je ekstrapoliran u oblast pre maksimalnog opterećenja, prikazan isprekidanom linijom na sl. 5. Uz pomoć koeficijenta k , određenog iz jed. (3), iz pretpostavljene trenutne dužine prsline, odnosno pretpostavljenog rasta prsline, može se definisati sila F_B , a potom i vrednost f_B prema jed. (4). Na ovaj način definisan je položaj tačke B u ekstrapoliranom delu. Za ocenjenu dužinu prsline je moguće naći nagib linije popustljivosti prema preporuci A3.1.5.4, iz lit. [9]. Počev od tačke B povlači se prava linija ispod nagiba popustljivosti, što daje novu tačku

$C(F_c, F_c)$ u preseku sa prvobitnom eksperimentalnom krivom. Opisanim postupkom se dobija sila F_c , koja odgovara pretpostavljenom rastu prsline. Sada je moguće izračunati vrednost J integrala iz jed. (2), koja sa dužinom prsline formira par vrednosti za konstrukciju J-R krive. Na ovaj način definisana statička J-R kriva za martenzitne čelike napona tečenja između 700 i 1400 MPa i indeksa deformacijskog ojačavanja ispod 0,15 je u daljem tekstu upoređena sa J-R krivama dobijenim metodom ispitivanja više epruveta prema ASTM E 1737 i korišćenjem SSPD metode [8].



Slika 5. Pristup konstrukciji krive otpornosti novim pristupom

Predložena metoda nema ograničenja u pogledu broja tačaka, što je prednost u poređenju sa ispitivanjem jedne epruvete rasterećivanjem i sukcesivnim merenjem popustljivosti. Uz to, pomeranje napadne tačke sile je jedina veličina koju treba meriti, što je prednost u odnosu na metodu pada potencijala. Ocenjuje se da se ova metoda može primeniti, sem u jednostavnim statičkim ispitivanjima, i za ispitivanje na niskim i povišenim temperaturama, kao i u udarnim ispitivanjima.

Ekstrapolacija datih jednačina u područje pre maksimalnog opterećenja nema fizičku podršku zbog različitog ponašanja materijala u njima. Na primer, u oblasti zatupljivanja vrha prsline ugao savijanja θ nije konstantan, zatvaranje prsline i odstupanje čela prsline utiču na oblik zavisnosti sile - pomeranje, odnos između procesne i plastične zone nije konstantan i razlikuje se od onog u oblasti plastičnog rasta prsline. Tačnost određivanja dužine prsline zavisi od ovih uticaja. Međutim, za praktičnu primenu bitno je da su oni u prihvatljivim granicama koje moraju biti određene.

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE R KRIVE

Eksperimenti za kalibraciju zavisnosti $\Delta E - \Delta a$ metodom pada potencijala su izvedeni sa čelikom visoke čvrstoće NIONIKRAL-70 (NN-70) za posude pod pritiskom, sa epruvetama iz ploča debljine 18 mm, proizvedenim u električnim pećima i uzastopnim valjanjem. Hemijski sastav i mehaničke osobine su date u tab. 1. i 2.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika NIONIKRAL-70 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
0,10	0,20	0,23	0,009	0,018	1,24	3,10	0,29	0,05	0,08

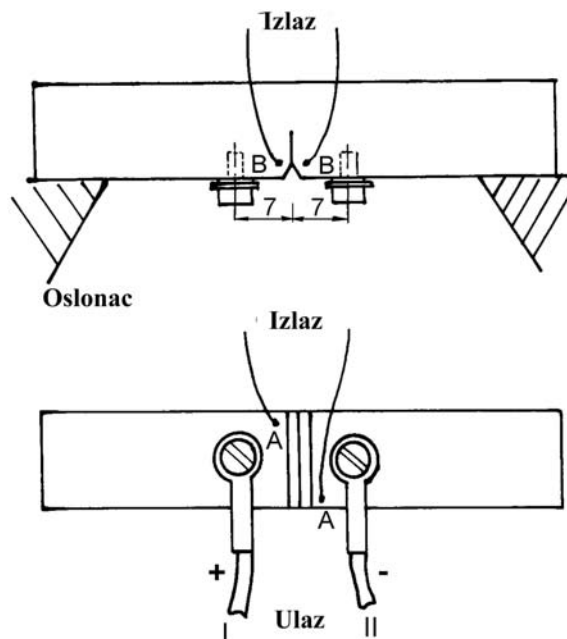
Tabela 2. Mehaničke osobine čelika NIONIKRAL-70

Pravac uzorka	Napon tečenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Kontrakcija	Energija udara (J) na°C		
	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)	Z (%)	+20	-60	-100
uzdužni	780	820	19	66	126	117	93
poprečni	770	810	20	74	81	76	49

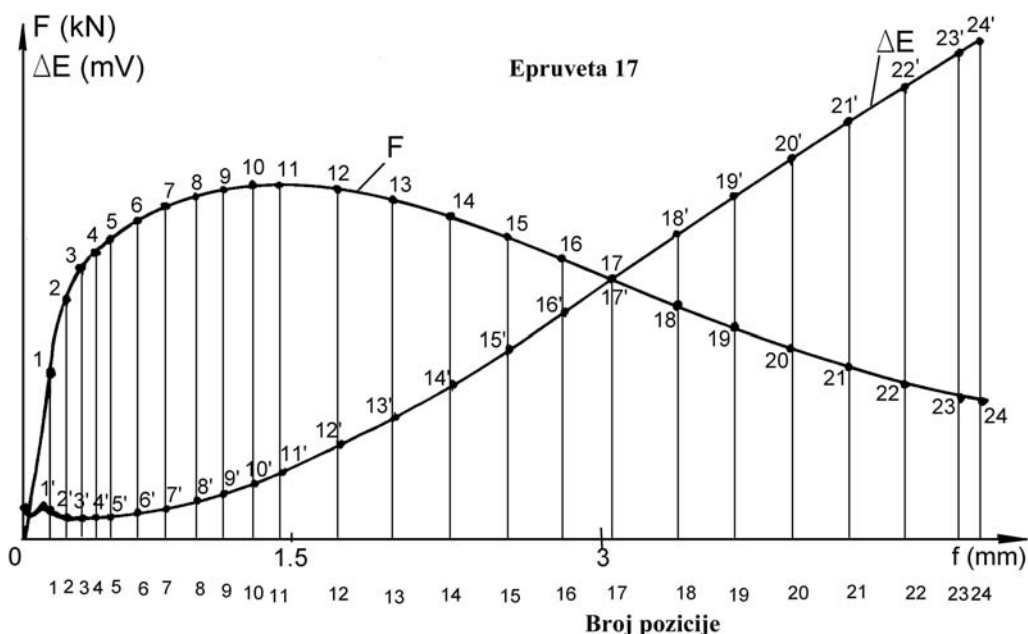
Sva ispitivanja su izvedena na standardnim Šarpi epruvetama (10x10x55 mm, V-zarez 2 mm), sa zamornom prslinom u skladu sa zahtevima ASTM E 812, dužine u rasponu od $(0,45-0,55)a/W$, gde je a ukupna dužine zamorne prsline, a W širina epruvete. Neki uzorci su bočno zarezani posle zamaranja pomoću standardnog Šarpi sekača do debljine od 2 mm sa svake strane, da bi se usmerio rast prsline. Izvor jednosmerne (DC) struje je bio tipa HP 6260 (120 A, 12 V). Signal pada potencijala je meren osciloskopom tipa TEKTRONIX 5103 sa ugrađenim pojačavačem. Ulazne provodnici jednosmerne struje za pad potencijala su korišćeni za signal, A-A i B-B. Izlazni provodnici su tačkasto zavareni za epruvetu u A-A i B-B (sl. 6).

Statičko ispitivanje za primenu SSPD metode je izvedeno na kidalici INSTRON M 8032 - 250 kN. Sila i potencijal su beleženi u funkciji od pomeranja (x -osa) na X-Y₁-Y₂ pisaču PHILIPS PM 8134. Tipični dijagrami dobijeni za silu i pad potencijala u zavisnosti od pomeranja napadne tačke sile su prikazani na sl. 7 [10].

Ispitivanje za određivanje dinamičke J-R krive je izvedeno na instrumentiranom Šarpi klatnu sa početnom brzinom tega 5,1 m/s i dodatno praćenim padom potencijala (sl. 6).



Slika 6. Šarpi epruveta pripremljena za ispitivanje



Slika 7. Eksperimentalna zavisnost sile F i pada potencijala ΔE od pomeranja napadne tačke sile f i postupak za određivanje parova vrednosti $J-da$

Tipični dijagrami, dobijeni za silu, energiju i pad potencijala u vremenu su prikazani na sl. 8 [10]. Postupak za određivanje J-R krive je isti kao i za statičko ispitivanje, jedina razlika je u osnovnom dijagramu, jer je ovde korišćena zavisnost sila F - vreme.

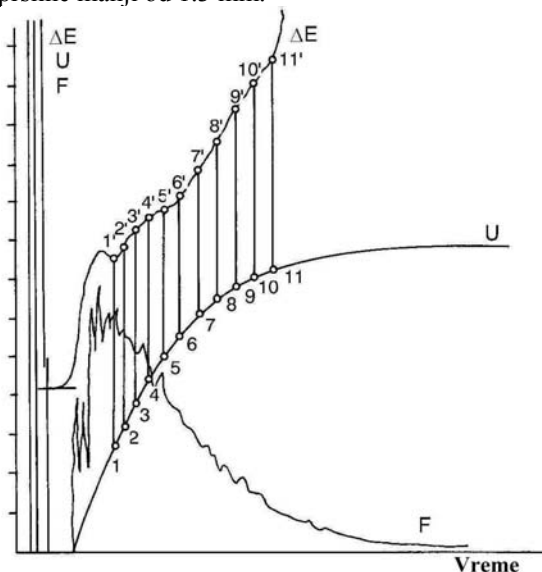
Na sl. 9. su isprekidanim linijama predstavljene J-R krive, dobijene SSPD metodom pomoću osnovnih dijagrama za silu F u statičkim i dinamičkim ispitivanjima, označene respektivno kao stat. SSPD i din. SSPD,.

Nova predložena metoda (PLLL) je primenjena na iste osnovne dijagrame za silu F u statičkom i dinamičkom ispitivanju. Rezultati su predstavljeni punim linijama na sl. 9, i označeni su kao stat. PLLL i dyn. PLLL, respektivno. Na istoj slici je J-R kriva, dobijena prema ASTM 1737 metodom sa više epruveta sa zamornim prslinama od istog čelika je predstavljena punom debelom linijom i označena kao stat. ASTM.

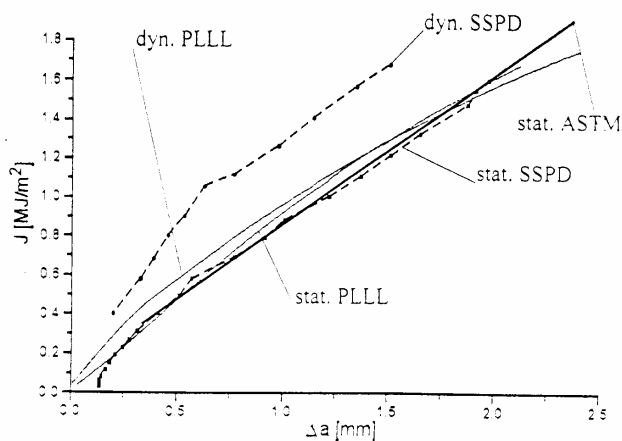
Iz sl. 9. se jasno vidi da su sve dobijene statičke J-R krive u dobroj saglasnosti, nezavisno od primenjenog postupka, sa

osnovnom krivom dobijenom metodom sa više epruveta prema ASTM 1737.

Dinamičke J-R krive, dobijene SSPD metodom su vidljivo iznad statičkih krivi, ali ona dobijena PLLL metodom je samo neznatno iznad ovih krivih, i ovo je slučaj samo za rast prsline manji od 1.3 mm.



Slika 8. Eksperimentalna zavisnost energije udara U , sile F i pada potencijala ΔE od vremena i postupak za određivanje parova vrednosti J - a



Slika 9. Poređenje J-R krivih, dobijenih u različitim uslovima

ZAKLJUČAK

Analiza primene dve metode, zasnovane na ispitivanjima neprekidno rastuće prsline u epruveti, radi određivanja statičkih i dinamičkih J-R krivih je ukazala na značajne prednosti predložene PLLL metode, zasnovane na proporcionalnosti dužine ligamenta i opterećenja. Ova metoda ne zahteva dodatno praćenje pada potencijala i podešavanje rasta prsline, dovoljna je zavisnost sila i pomeranja napadne tačke sile.

Metoda sa jednom epruvetom se može primeniti i na nehomogene strukture, kao što su zavareni spojevi i zona uticaja toplote u njima.

U slučaju uslova statičkog opterećenja J-R krive dobijene primenom oba postupka iskazale su dobro međusobno slaganje, kao i slaganje sa J-R krivom dobijenom metodom više epruveta prema ASTM 1737, uzetom za osnovnom krivom za poređenje.

Položaj dinamičke krive je vidljivo iznad statičke ako se one određuju SSPD metodom. Međutim, položaj dinamičke krive, dobijene primenom PLLL metode je samo neznatno iznad statičke krive, dok je za veći rast prsline čak i ispod statičke krive.

Ovo ponašanje zahteva dalje ispitivanje ne samo PLLL metode, nego i opšteg ponašanja dinamičkih J-R krivi. Uzimajući u obzir efekte PLLL metode, kao što je promena ugla savijanja, zatvaranje prsline u metodi uzastopnog popuštanja, zakrivljenje čela prsline i odnos procesne i plastične zone, zahteva se detaljnije ispitivanje i bolje razumevanje. Kod udarnih ispitivanja na instrumentiranom klatnu takođe je neophodno pratiti opšte zahteve ispitivanja [11].

LITERATURA

1. Mac Gillivray, H.J., Turner, C.E. (1989) A Comparison of Dynamic R-Curve Methods, In: Fourth International Conference on the Mechanical Properties of Materials at high Rates of Strain, Oxford.
2. Bohme, W. (1989) Experimentelle Untersuchungen zum elastisch-plastischen Bruchverhalten eines Druckbehälterstahls unter dynamischer Beanspruchung, Scientific Report W3/89, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg.
3. Mac Gillivray, H.J., Akum, E.R., Brooks, J.P., Grabulov, V. (1987). Developments in Measuring Techniques for High Rate Dynamic Fracture Testing, In: International Conference on Advanced Measurement Techniques, London.
4. Grabulov, V., Mac Gillivray, H.J., Tomić, D., Jovanić, P. (1992). In: Reliability and structural integrity of advanced materials, pp. 315-320, Sedmak, S., Sedmak, A., Ružić, D. (Eds), EMAS, Warley, West Midlands, U.K.
5. Irwin, G.R. (1997) in: "Mechanical testing" ASM HANDBOOK Vol. 8, pp. 439-458. ASM, Metals park, Ohio.
6. Wnuk, P.M. (1980) in: Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma, Sedmak, S. (Ed), TMF-GOŠA, Beograd
7. Halliday, M.D., Beevers, C.J. (1980). in: The measurement of crack length and shape during fracture and fatigue, pp. 83-97, Beevers, C.J. (Ed.) EMAS, Warley, West Midlands, U.K.
8. Blačić, I. (2000) Određivanje krive otpornosti iz zavisnosti opterećenje – pomeranje napadne tačke SE(B) epruvete, Naučni izveštaj, VTI VI, Beograd
9. ESIS P2-92 (1992) ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials
10. Grabulov, V. (1995) Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
11. Ireland, D.R. (1974), in Instrumented Impact Testing, STP 563, ASTM, Philadelphia, p 3-29