

## Određivanje dinamičke krive otpornosti metalnih materijala

Venceslav K. Grabulov, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Ivo D. Blačić, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Dinamička kriva otpornosti, kao pokazatelj otpornosti materijala ka inicijaciji i rastu duktilne prsline u uslovima dinamičkog delovanja sile, je važan element za potpunu karakterizaciju metalnih materijala. Dat je pregled metoda koje se koriste, kao postupak po Čiperfildu, ispitivanjem tegom do graničnika, smanjenjem energije i ispitivanjem u oblasti prelaznih temperatura. Posebno je prikazan postupak određivanja krive otpornosti primenom potencijometrijske metode, koji je razvijen u laboratoriji VTI VJ. Rezultati dobijeni primenom novog postupka su pokazali da je u pitanju tehnika koja daje reproduktivne rezultate koji su u saglasnosti sa teorijskim razmatranjima i sa rezultatima dobijenim primenom drugih metoda koje su u razvoju. Kroz analizu prednosti i nedostataka raznih primenjenih tehnika rada, potvrđene su prednosti novopredložene metode za određivanje dinamičke krive otpornosti.

*Ključne reči:* Ispitivanje materijala, kriva otpornosti,  $J$ -integral, mehanika loma, inicijacija prsline, rast prsline.

### Uvod

NA konstrukcijskim elementima i inženjerskim objektima opterećenje često deluje kao udar. Ovaj vid opterećenja je od posebne važnosti u dinamici konstrukcija. Za analizu ponašanja materijala u dinamičkim uslovima delovanja sile nisu dovoljna saznanja o materijalu stečena u statičkim uslovima. Radi bezbednog i racionalnog dimenzionisanja konstrukcija, od interesa je da se poznaju ekstremne vrednosti i vremenski tok dinamičkih uticaja.

Tehnike ispitivanja mehanike loma u statičkim uslovima opterećenja su već razvijene i nekoliko standardnih metoda ispitivanja je našlo praktičnu primenu. Mnoge komponente i delovi konstrukcija su izloženi udarnom opterećenju pri normalnoj eksploataciji ili slučajnom preopterećenju. Tu spadaju, pre svega, transportna sredstva, brodovi, železničke šine, morske platforme, mostovi, nuklearna postrojenja, vojna vozila i drugi objekti izloženi udarnom ili eksplozivnom opterećenju ili zemljotresu. Lomne karakteristike konstrukcijskih čelika umnogome zavise od brzine deformisanja, pri čemu treba očekivati da žilavost opada sa porastom brzine delovanja opterećenja [1].

Zbog toga postoji značajan interes za kvantificiranje otpornosti materijala ka inicijaciji i propagaciji duktilne prsline pri dinamičkim uslovima delovanja sile. U stručnoj literaturi je obrađeno nekoliko eksperimentalnih tehnika određivanja dinamičke  $R$ -krive, koje daju prihvatljivu tačnost i dobru reproduktivnost. To su: metode ispitivanja na više uzoraka, postupak po Čiperfildu, metoda ispitivanja smanjenjem energije, ispitivanja u oblasti prelaznih temperatura i postupak ispitivanja padajućim tegom do graničnika. Za određivanje dinamičke  $R$ -krive ispitivanjem jednog uzorka, primenjuje se postupak kod koga se praćenje rasta prsline tokom testa obavlja putem pada električnog potencijala.

Ove, relativno jednostavne, tehnike određivanja dinamičke  $R$ -krive, zajedno sa svojim prednostima i ograničenjima su predmet ovog rada. Kao ilustracija su prikazani i rezul-

tati dobijeni njihovom primenom. U sadašnjem strepenu razvoja ove metode dovoljno ukazuju na ponašanje materijala tokom loma u dinamičkim uslovima delovanja sile, bez obzira što je njihova tačnost nešto manja u odnosu na standardizovane metode za ispitivanje u statičkim uslovima.

### Mehanika loma u dinamičkim uslovima

Za ocenu ponašanja materijala u dinamičkim uslovima delovanja sile, merodavni su dinamički parametri mehanike loma. To su parametri mehanike loma, pre svega žilavost loma u dinamičkim uslovima,  $K_{I_d}$ , i dinamička kriva otpornosti. To su parametri koji se određuju pri dinamičkom delovanju sile.

Ako je opterećenje udarno, funkcija sile  $F(t)$  menja se diskontinualno, pa će izazvati i diskontinualne promene opterećenog dela. Impuls je kratkotrajni uticaj sile velikog intenziteta.

Problem rasta prsline bilo u konstrukcijskim delovima tokom ispitivanja, bilo na epruvetama ili delovanjem udarnog opterećenja, zahteva da se impuls i njegovo dejstvo objasne sa mehaničkog i matematičkog aspekta.

*Dinamički kritični faktor intenziteta napona  $K_{I_d}$  i dinamička kriva otpornosti*

Razvoj prsline je praćen obrazovanjem plastične zone ispred njenog vrha čija veličina poluprečnika  $r_y$  se za statičke uslove dejstva opterećenja (spororastuća veličine sile) može odrediti iz izraza:

$$2r_y = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_t^*} \right)^2 \quad (1)$$

gde je  $\sigma_t^*$  - napon koji prati plastičnu zonu (može da se uzme kao napon na granici tečenja).

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

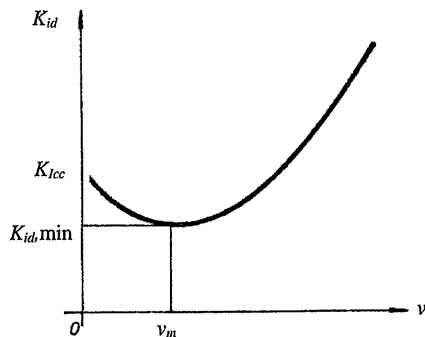
Pri analizi rasta prsline mora da se uzme u obzir uticaj vremena. Razvoj plastične deformacije praćen je i pojavom toplote koja na vrhu prsline može doprineti znatnom povećanju temperature, tako da se i osobine materijala u izvesnoj meri menjaju. Odatle sledi da će otpornost prema širenju prsline, i sposobnost zaustavljanja prsline koja se kreće, zavisiti od brzine dejstva opterećenja i da će pri udarnom dinamičkom opterećenju faktor intenziteta napona biti različit od faktora intenziteta napona utvrđenog ispitivanjem standardnim metodama (ASTM E399 i BS 5472). To upućuje na potrebu da se definiše dinamički faktor intenziteta napona koji zavisi od brzine dejstva opterećenja i brzine razvoja prsline,  $v$ .

$$K_{ld} = K_{ld}(v) \quad (2)$$

Na sl.1 je pokazano da se faktor intenziteta napona menja sa brzinom razvoja prsline [2].

Pri brzini  $v=0$  faktor intenziteta napona na sl.1 odgovara žilavosti loma pri ravnoj deformaciji  $K_{lc}$ :

$$K_{lc} = K_{ld} \text{ kada } v \rightarrow 0 \quad (3)$$



Slika 1. Zavisnost dinamičkog faktora intenziteta napona  $K_{ld}$  od brzine rasta prsline,  $v$

Da bi veličina  $K_{ld}(v)$  bila parametar, ona mora odgovarati uslovima ravne deformacije što znači da zahtevi u pogledu debljine i brzine rasta prsline, odnosno brzine dejstva opterećenja, moraju biti ispunjeni. Zbog toga se postavlja i pitanje kako definisati žilavost loma pri dinamičkom opterećenju, odnosno kako definisati kritičnu veličinu faktora intenziteta napona pri udarnom opterećenju. Treba zapaziti da u opsegu malih brzina parametar  $K_{ld}$  nije osetljiv na brzinu razvoja prsline i da je ta vrednost ujedno i vrednost  $K_{lc}$ .

S obzirom da je ovaj rad usmeren ka  $J$ -integralu, kao parametru ocene otpornosti prema lomu i u dinamičkim uslovima, u ovom delu rada razmatraće se dinamički  $J$ -integral, odnosno  $J$ -integral za dinamičke uslove delovanja sile.

U slučaju da prsline raste pod dejstvom dinamičkog opterećenja, veličina energije  $J_d$  [3], koja predstavlja dinamičku verziju Rajsovog integrala, ima oblik:

$$J_d = \int_T \left[ \left( \omega + \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) dy - T \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right] \quad (4)$$

gde su:  $v$ - brzina razvoja prsline,  $\omega$ - energija deformacije svedena na jedinicu debljine.

Jednačina (4) potpuno je važeća za konstantnu brzinu rasta prsline. Za poznati konturni integral  $J_d$  može da se odredi dinamički faktor intenziteta napona  $K_{ld}$  iz izraza:

$$K_{ld} = \sqrt{E \cdot J_d} \quad (5)$$

Ispitivanja radi eksperimentalnog određivanja vrednosti  $K_I$  i  $J$ -integrala u dinamičkim uslovima se izvode na istim i isto pripremljenim (zamorenim) uzorcima kao i za statičke uslove definisane standardima ASTM E399, ASTM E813 i ASTM E1152.

Dinamičku otpornost prema lomu  $K_{ld}$  treba računati prema sledećem izrazu:

$$K_{ld} = \frac{F_a}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

gde su:  $F_a$ - kritično opterećenje loma,  $B$ - debljina epruvete,  $W$ - širina epruvete,  $a$ - prosečna dužina prsline,  $f(a/W)$ - bezdimenzionalni koeficijent koji uzima u obzir geometriju epruvete.

Sprovedena ispitivanja grupe autora ovakvim postupkom ispitivanja ukazuju da se vrednosti integrala  $J_d$  mogu računati prema izrazu:

$$J_d = \frac{A}{B(W-a)} \cdot g\left(\frac{a}{W}\right) \quad (7)$$

gde su:  $A$ - površina ispod krive sila - pomeranje napadne tačke sile,  $f$ , koji odgovara utrošenom radu,  $g(a/W)$  - korelacioni bezdimenzionalni koeficijent koji unosi popravku zbog komponente zatezanja u opterećenju epruvete.

Kada se izračuna vrednost  $J_d$ , tada se može odrediti dinamički faktor intenziteta napona prema sledećem izrazu [4]:

$$K_{ld} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} J_d \quad (8)$$

gde je  $\nu$ - Poasonov broj.

Slično statičkim uslovima, primena dinamičkog  $J$ -integrala ( $J_d$ ) za praćenje rasta prsline, odnosno otpornosti materijala prema rastu prsline u dinamičkim uslovima delovanja sile, je problematična. Zbog toga se i u ovom slučaju prešlo na koncept zavisnosti  $J_d - \Delta\alpha$ , odnosno dinamičke krive otpornosti,  $J$ - $R$  krive. Dinamička kriva otpornosti opisuje ponašanje ispitivanog materijala prema rastu prsline za nestatičke uslove delovanja sile kada se dovoljno pouzdano može odrediti vrednost  $J$ -integrala za takve uslove delovanja sile,  $J_d$ , i odgovarajuće vrednosti rasta prsline,  $\Delta\alpha$ .

*Tehnike ispitivanja inicijacije prsline pri udarnom dejstvu sile*

Ispitivanje inicijacije prsline pri dinamičkim uslovima delovanja sile je posebno ineresantno, jer su konstrukcije često izložene takvom opterećenju. Najjednostavnije metode udarnog ispitivanja su definisali Šarpi i Izo. Ova ispitivanja koriste malu epruvetu sa zaobljenim zarezom, pri čemu se meri ukupna energija apsorbovana pri lomu uzorka na klatnu. Dodatak pretvarača za merenje sile na čekiću klatna, koji su prvo uveli Tanaka i Umekava [5] krajem pedesetih godina, je omogućio da se pouzdano meri sila na epruveti tokom udara.

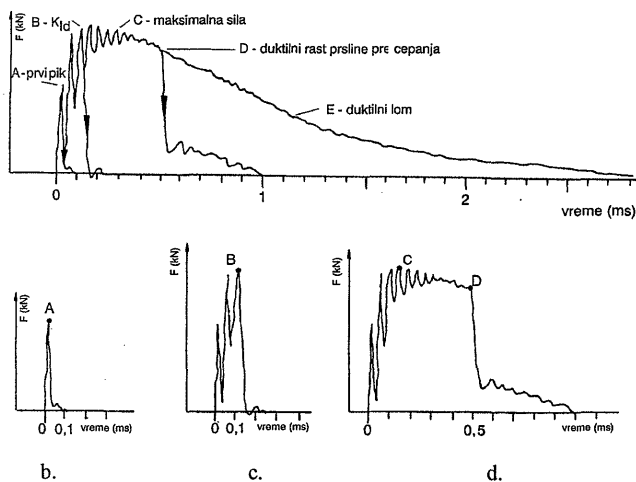
Danas se u laboratorijskim ispitivanjima koriste instrumentirana Šarpi klatna energije do 600 J. Za veće brzine delovanja sile koriste se velika klatna i padajući tegovi (kapaciteta do 0,5 MJ) koji se mogu dopunjavati servohidrauličnim mašinama velike brzine. Takva oprema omogućava brzine udara u intervalu 5-20 m/s. Za veće brzine udara se koriste mašine koje deluju na principu gasnog generatora, pri čemu se može ostvariti brzina do 50 m/s.

Podatke o ispitivanju na instrumentiranom klatnu su prvi saopštili Rejdon i Tarner [6] šezdesetih godina, a danas se ono široko primenjuje naročito za merenje  $K_{ld}$ , na primer u radovima Servera i Tetelmana [7] i Kobajašija [8]. Tipičan

neprečišćeni dijagram za plastični lom je prikazan na sl.2a [9]. Na istoj slici su ucrtana tri oblika loma koji su razdvojeni na sl.2b, c i d. Dijagram se sastoji od poremećenih oscilujućih talasnih oblika koji dostižu maksimum, a zatim se polako smanjuju. Veličina oscilacije prvog opterećenja zavisi uglavnom od inercije epruvete, a mnogo manje od nje- ne žilavosti [7], tako da izrazito kruti lom koji se javlja u tački A dijagrama ne može biti direktno analiziran (sl.2b). U ovom slučaju potrebno je obaviti korekciju zbog inercije [8], ili je potrebno da se zapis sila-vreme iskoristi za fitovanje sa numeričkim rešenjem pomoću dinamičkog programa konačnih elemenata kao u radu Kura i sar. [10]. Druga mogućnost za smanjenje uticaja inercije je ispitivanje sa smanjenom brzinom klatna ("Low-blow" test) [11,12]. Međutim, u ovom slučaju pored smanjenja inercije smanjuje se i brzina delovanja opterećenja. Kada do loma dolazi posle dve ili tri oscilacije u signalu opterećenja, kao u tački B (sl.2c), dinamička žilavost loma,  $K_{Id}$ , se može izračunati pomoću jednačine (6) ili jednačine (9) [1]:

$$K_{Id} = Y\sigma\sqrt{a} \quad (9)$$

gde su:  $Y$ - faktor geometrije,  $\sigma$ - napon,  $a$ - dužina prsline.



Slika 2. Karakteristični dijagrami sila-vreme

Kada se dostigne opšte tečenje materijala, zakoni linear- no-elastične mehanike loma više ne važe pa, u tom slučaju, mora da se primeni energetski pristup zasnovan na  $J$ -integralu. Inicijacija rasta prsline u plastičnom području ne može da se utvrdi direktno na dijagramu sile, ali radi poređenja može da se uzme žilavost pri maksimalnom opterećenju (tačka C) i ako neki autori [13] tvrde da to može biti i nepouzdan. U malom opsegu prelazne temperature niskolegiranih čelika, može doći do malog prirasta prsline pre početka cepanja, tačka D (sl.2d).

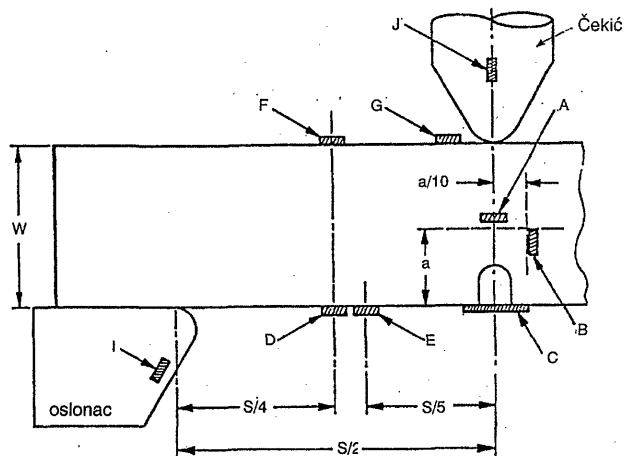
Teškoće u otkrivanju inicijacije sa dijagrama sila-vreme su uslovile razvoj većeg broja metoda za nezavisno merenje inicijacije prsline. U tom smislu, najčešće se koriste ispitivanja na instrumentiranom Šarpi klatnu, pri čemu se koriste ili modifikovani merači otvaranja vrha prsline ili merenje pomoću mernih traka na epruveti.

Kod metode određivanja dinamičkog pomeranja vrha prsline, koriste se standardni ili modifikovani merači otvaranja uzorka sa mernim trakama. Ovi merači su pogodni za relativno male brzine opterećenja (kvazidinamički test). Za isti nivo brzine opterećenja mogu se uspešno koristiti beskontaktni (magnetski) pretvarači pomeranja vrha prsline [1]. Praćenjem magnetske emisije tokom loma pri udarnim ispitivanjima, takođe je moguće registrovati inicijaciju [14].

Uređaji koji registruju inicijaciju pri velikim brzinama delovanja sile na bazi vrtložnih struja mogu uspešno da se primene za epruvete tipa Šarpi, ali nedostatak je što zahtevaju specijalni elektronski sistem i koriste velike i lomljive pretvarače, instalirane na samom uzorku.

Najnoviji prilaz u praćenju inicijacije u dinamičkim uslovima delovanja sile koristi laser koji registruje promene na vrhu zareza na uzorku, kao meru za CTOD. Ovu metodu je razvio u Finskoj Rintam [15]. Nedostatak ove metode je što zahteva specijalnu optičku opremu i prilagođavanje klatna. Nabrojane pomoćne metode omogućuju da se prati pomeranje otvora prsline u funkciji vremena. Na bazi odstupanja od dobijenog nagiba krive, može se odrediti veličina CTOD pri kojoj dolazi do inicijacije.

Suština tehnike primene mernih traka na epruveti je da se prilikom udarnog ispitivanja koristi signal sa mernе trake zalepljene na epruveti. Na taj način se smanjuju problemi udara i inercije koji se javljaju kada je merna traka na klatnu (čekiću). Na sl.3 su prikazani najčešći položaji mernih traka, kako ih je u pregledu [16] razmatrao Ajrland. Pokazalo se da merna traka na vrhu prsline (traka A) može dati prihvatljiv podatak o inicijaciji prsline i pri krutom i pri plastičnom lomu.



Slika 3. Položaji mernih traka [9]

### Postupci za određivanje dinamičke krive otpornosti

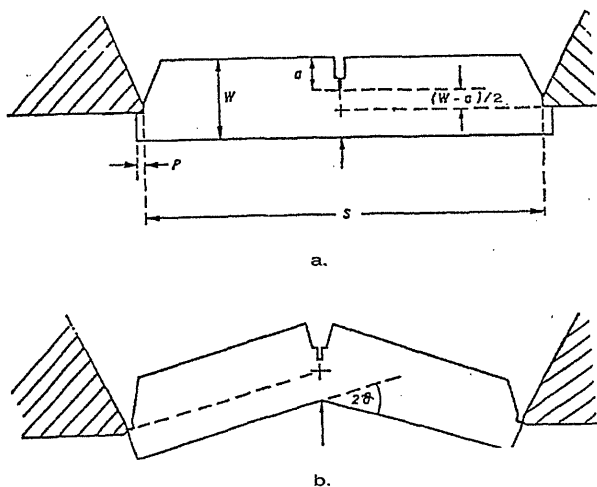
Postupci određivanja parametara mehanike loma za statičke uslove su standardizovani. Među njima je i standard ASTM E1152, koji se odnosi na konstrukciju  $J$ - $R$  krive za statičke uslove delovanja sile.  $S$  obzirom da su konstrukcije izložene dinamičkim ili promenljivim opterećenjima, za konstruktore je važna ocena otpornosti materijala prema propagaciji prsline za takve uslove delovanja sile. Pokazatelj ponašanja materijala pri rastu prsline u dinamičkim (udarnim) ili promenljivim uslovima delovanja sile je tzv. dinamička kriva otpornosti, dinamička  $J$ - $R$  kriva, odnosno zavisnost  $J$ - $\Delta a$  za dinamičke uslove. Za razliku od statičke krive otpornosti, za dinamičku krivu otpornosti za sada ne postoji standard niti opšteprihvaćeni postupak. Trenutno se u literaturi može sresti nekoliko metoda za određivanje dinamičke zavisnosti  $J$ - $\Delta a$ .

U pregledu Turnera [17] obuhvaćena su tri postupka za određivanje dinamičke krive otpornosti,  $J$ - $R$  krive, koji su u tom periodu bili aktuelni. To su: tehnika po Čiperfildu, tehnika određivanja dinamičke  $R$ -krive ispitivanjem loma u području prelaznih temperatura (The Cleavage R-curve) i

postupak određivanja dinamičke  $J$ -krive primenom potencijometrijske metode za praćenje rasta prsline [18]. Pored toga, u razvoju je i postupak udara tegom do graničnika, a u međuvremenu su se pojavili radovi gde se dinamička  $J$ - $R$  kriva konstruiše ispitivanjem smanjenjem energije udara ("Low-blow" test) [11,12].

#### Postupak Čiperfilda

Ovaj postupak konstruisanja dinamičke  $J$ - $R$  krive se zasniva na ideji da se proces loma prekine posle različitog nivoa veličine prirasta prsline. Serijom ispitivanja (za različite vrednosti  $\Delta a$ ) dobijaju se parovi vrednosti  $J$ - $\Delta a$  za konstruisanje krive otpornosti. Koristeći tu ideju (prekid loma za različit nivo prirasta prsline) Čiperfild [19] je predložio postupak za određivanje dinamičke  $J$ - $R$  krive koji se može izvesti na instrumentiranom Šarpi klatnu. Postupak po Čiperfildu koristi epruvete obrađene kao na sl.4.

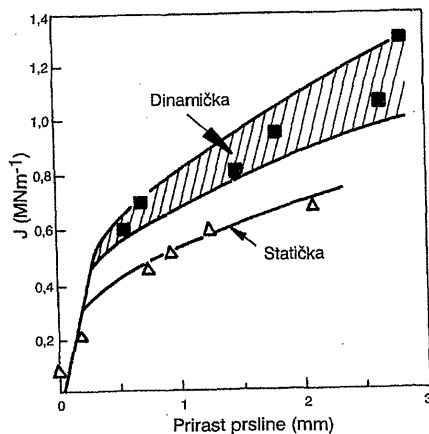


Slika 4. Izgled epruvete po Čiperfildu: a) pre ispitivanja; b) posle ispitivanja

Ovaj postupak koristi seriju epruveta koje se međusobno razlikuju po veličini ispusta  $P$  (sl.4). Tokom loma, epruveta gubi oslonac na klatnu pri različitim uglovima savijanja, a time i različitim vrednostima za rast prsline. Vrednost prirasta prsline se menja zavisno od dužine ispusta ( $P$ ) na uzorku. Posle ispitivanja epruveta se termički boji i lomljenjem otvara, pa se plastični prirast prsline,  $\Delta a$ , meri direktno sa površine preloma. Ukoliko je registrovan dijagram sila-vreme, može da se izračuna energija utrošena do trenutka kada epruveta izgubi oslonac. Na taj način, nakon serije ispitivanih epruveta, može da se konstruiše dinamička  $J$ - $R$  kriva.

Na sl.5 je prikazana dinamička  $J$ - $R$  kriva za čelik HY-130 konstruisana primenom metode po Čiperfildu na uzorcima dimenzija  $10 \times 10 \times 55$  mm.

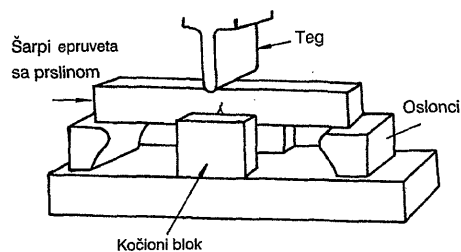
Prednost ove metode je u tome što ne zahteva specijalnu opremu. Pored toga što je potrebno više uzoraka, nedostatak metode je što pri radu sa malim prirastima prsline dolazi do iskliznuća uzorka, jer se radi sa malim veličinama ispusta  $P$ . Drugi problem, koji se javlja kod ovih ispitivanja, je prirast prsline i nakon prolaska uzorka između oslonaca zbog energije rotacije koja zaostane u epruveti, što može značajno da utiče na tačnost merenja [17].



Slika 5. Statička i dinamička  $J$ - $R$  kriva za čelik HY-130 (Čiperfildov metod) [17]

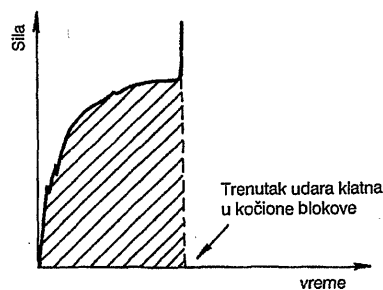
#### Postupak udara tegom do graničnika

Ovaj postupak određivanja parova vrednosti  $J$ - $\Delta a$  se zasniva na udarnom ispitivanju (klatnom ili padajućim tegom) uzoraka za savijanje u tri tačke. Međutim, lom uzorka se ne odvija do kraja, jer se čekić (ili teg) zaustavi usled sudara sa kočionim blokovima (graničnicima), sl.6 [20].



Slika 6. Šematski prikaz metode tege i kočionog bloka

Primenom instrumentiranog klatna ili tege dobija se dijagram "sila-vreme", kao na sl.7. Površina ispod dijagrama sila-vreme, omeđena trenutkom udara klatna u graničnik (šrafirana površina na sl.7) je proporcionalna utrošenoj energiji, tj. vrednosti  $J_1$  integrala za ostvareni prirast prsline,  $\Delta a_1$ .



Slika 7. Tipičan dijagram sila-vreme za metod tege i graničnika

Za dobijanje drugog para tačaka  $J_2$ - $\Delta a_2$ , test se ponavlja na drugom uzorku, pri čemu se menja visina graničnika, od čega zavisi dokle čekić ili teg može da lomi uzorak, odnosno zavisi kolika će biti vrednost za  $\Delta a_2$ . Serijom ispitivanih uzoraka sa različitim visinama kočionog bloka može se dobiti dovoljan broj parova tačaka  $J$ - $\Delta a$  za konstruisanje dinamičke krive otpornosti.

O primeni ove metode nema mnogo podataka u dostupnoj literaturi. Nedostatak metode je pojava energije deformacije graničnika i korišćenje više uzoraka. Naime, pri iz-

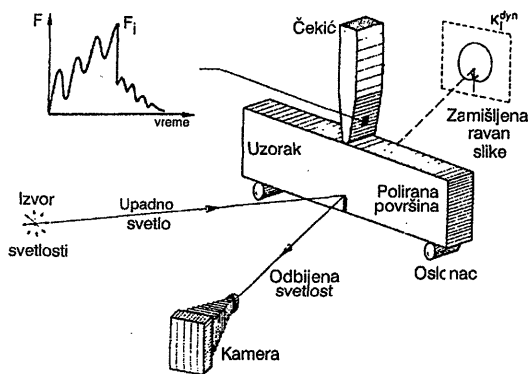
vođenju opita se registruje ukupno apsorbovana energija klatna ili tega, pa se kao veliki problem javlja razdvajanje ukupno utrošene energije na deo energije utrošen za rast prsline i deo energije utrošen na deformaciju bloka (kočnice). Zbog toga ovaj pokušaj nije dao dovoljno precizne rezultate.

#### Postupak smanjene energije

Ovaj opit [11,12] koristi sličnu ideju kao metod "tega i graničnika". U ovom slučaju se, takođe, koristi instrumentirano klatno ili padajući teg. Delimični lom uzorka se ne postiže graničnicima, već smanjivanjem energije tega (klatna). Na osnovu dijagrama "sila-vreme" izračunava se vrednost  $J$ -integrala, dok se veličina  $\Delta a$  direktno meri. To znači da se smanjenjem energije udara tega (klatna) postiže to da se lom zaustavi ranije i dobije manja vrednost  $\Delta a$ . Serijom ispitivanih uzoraka sa promenljivom energijom klatna (tega) se dobija serija parova  $J$ - $\Delta a$  za konstrukciju dinamičke  $J$ - $R$  krive. Nedostatak ovog postupka je u tome što nije ujednačena brzina tega (klatna) za sva ispitivanja iz jedne serije, već za svaku tačku na dijagramu  $J$ - $R$  krive dobija se različita brzina udara tega.

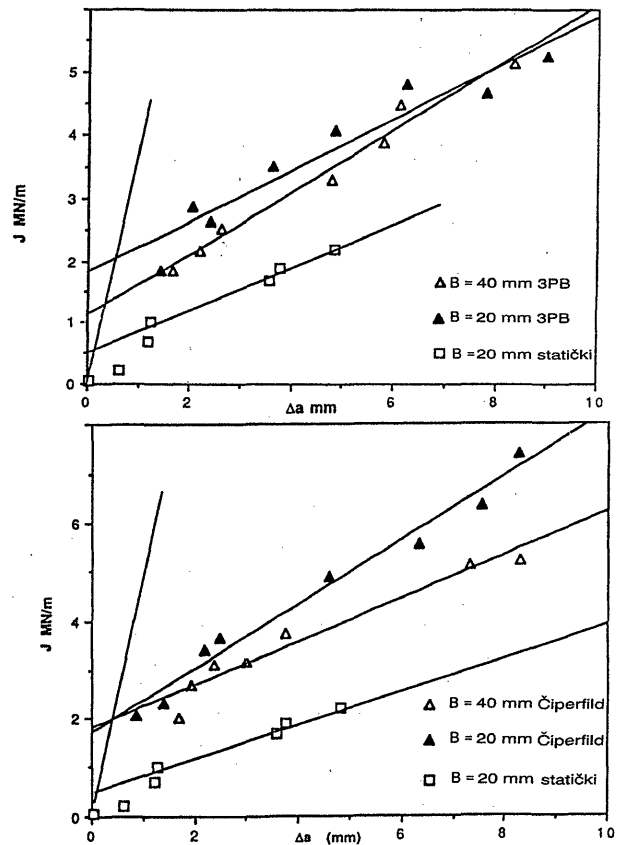
Modifikacija ove metode se sastoji u tome da se održi brzina udara tega (klatna), ali i da se različit prirast prsline, odnosno zaustavljanje procesa loma, postiže smanjenjem težine tega. Međutim, ni u ovom slučaju uslovi ispitivanja nisu isti za sva ispitivanja u seriji.

Na razvoju ove metode trenutno se najviše radi. Na sl.8 šematski je prikazana aparatura za izvođenje ispitivanjem smanjenjem energije udara, pri čemu se prirast meri ultrabrzom kamerom [12].



Slika 8. Šematski prikaz aparature za ispitivanje smanjenjem energije udara

Na sl.9 su prikazane dinamičke  $J$ - $R$  krive za ugljenično-manganski čelik prema BS 4360-50E i to za uzorke dimenzija 20x40x180 mm oznake 3PB 20 i dimenzija 40x40x180 mm oznake 3PB 40 [21]. Dijagrami na sl.9a su konstruisani primenom ispitivanja smanjenjem energije udara u uslovima promenljive brzine tega, a dijagrami na sl.9b su dobijeni primenom metode po Čiperfildu. Rezultati na sl.9 nedvosmisleno pokazuju da je položaj dinamičke  $J$ - $R$  krive pomeren ka višim vrednostima  $J$ -integrala (za istu vrednost  $\Delta a$ ) nezavisno od toga da li je u pitanju ispitivanje smanjenjem energije udara ili po metodi Čiperfilda. Rezultati sa sl.9 ukazuju da i dimenzije ispitivanih uzoraka utiču na položaj dinamičke  $J$ - $R$  krive. Naime, položaj dinamičke  $J$ - $R$  krive je nešto viši kada su u pitanju manji uzorci (debljine 20 mm) u odnosu na uzorke debljine 40 mm za oba primenjena postupka ispitivanja.

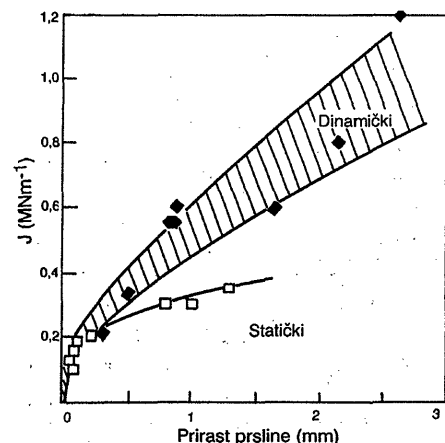


Slika 9. Položaj statičkih i dinamičkih  $J$ - $R$  krivih (čelik prema BS 4360-50E): a) postupak smanjene energije; b) Čiperfild metod

#### Ispitivanja u oblasti prelaznih temperatura

Prilikom udarnih ispitivanja niskolegiranih čelika u oblasti prelaznih temperatura može doći do pojave malog prirasta prsline pre cepanja u tački D (sl.2). Serijom ispitivanih uzoraka na raznim temperaturama u uskom temperaturnom intervalu oko prelazne temperature mogu se dobiti različite dužine prirasta prsline pre cepanja. Registrovanjem promene sile u funkciji vremena mogu se izračunati vrednosti utrošene energije za duktilni rast prsline pre cepanja. Dužina prirasta prsline se meri neposredno na površini preloma. Ako se zanemare razlike u temperaturama ispitivanja nakon ispitivanja više uzoraka, mogu se dobiti parovi vrednosti  $J$ - $\Delta a$  i konstruisati kriva otpornosti.

Na sl.10 je prikazana dinamička  $J$ - $R$  kriva za niskolegirani čelik BS 1501, konstruisana primenom metode ispitivanja u području prelaznih temperatura [22].



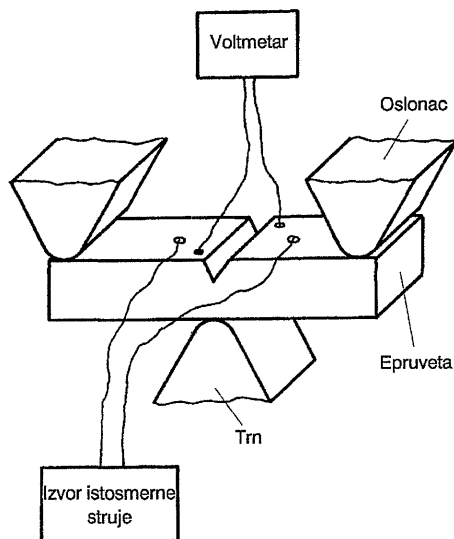
Slika 10. Statička i dinamička  $J$ - $R$  kriva za čelik BS 1501-271 [22]

Primena ove metode je ograničena samo na ispitivanje čelika sa izraženom prelaznom temperaturom i to na niskim temperaturama. Zanemarivanje razlika u temperaturi ispitivanja od uzorka do uzorka svakako nepovoljno utiče na tačnost merenja.

*Postupak određivanja krive otpornosti primenom potencimetrijske metode za praćenje rasta prsline*

Ovaj postupak određivanja prametara krive otpornosti je razvijen u laboratorijama Vojnotehničkog instituta VJ i zasnovan na ideji praćenja rasta prsline tokom loma uzorka kalibracijom dobijenom potencimetrijskom metodom.

Potencimetrijska metoda, odnosno metoda merenja pada električnog potencijala, je rasprostranjena i prihvaćena za praćenje inicijacije i rasta prsline tokom laboratorijskih ispitivanja. Ova metoda se zasniva na promeni električnog otpora tela sa prirastom prsline. U praksi se električni otpor retko meri. Umesto toga meri se razlika potencijala (napona) između dve tačke koje se nalaze sa različitih strana u odnosu na prslinu. U svojoj najjednostavnijoj formi, metoda se zasniva na povezivanju uzorka sa prslinom u kolo konstantne jačine struje (istosmerne ili naizmenične) uz istovremeno merenje vrednosti električnog potencijala između dve tačke na uzorku koje se nalaze sa različitih strana ravni kroz koju se prostire prsline. Na sl.11 je dat šematski prikaz postupka merenja promene potencijala.

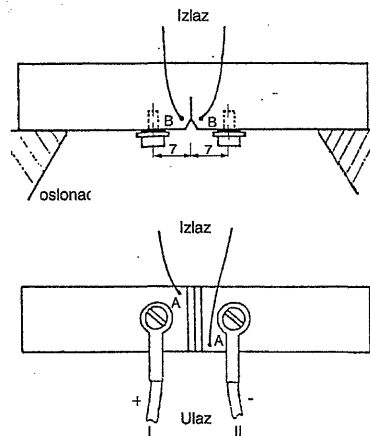


Slika 11. Šematski prikaz postupka merenja promene potencijala

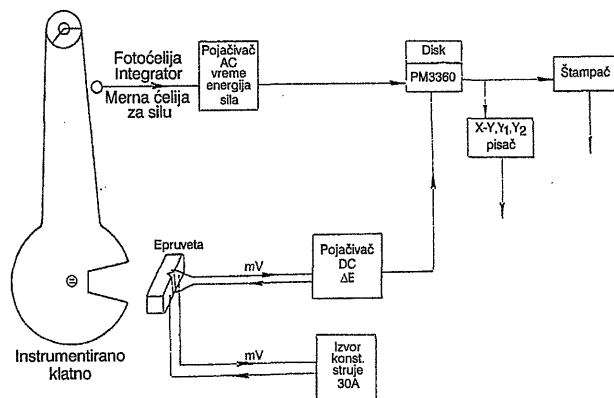
Prirastom prsline presek dela uzorka bez prsline (ligamenta) se smanjuje, električni otpor se povećava, a samim tim i razlika potencijala između tačaka. Praćenjem ove razlike potencijala i upoređivanjem sa razlikom potencijala na početku ispitivanja ili na delu uzorka bez prsline, može se izračunati dužina ili prirast prsline.

Standardni elektropotencimetrijski metod za merenje dužine prsline primenom istosmerne struje je uspostavljen početkom šezdesetih godina [23], dok je nešto kasnije počela primena i naizmenične struje za merenje dužine prsline [24].

U pristupu određivanja krive otpornosti, primenom kalibracije dobijene na bazi merenja pada potencijala, uzorak (sl.12) se vezuje u sistem kao na sl.13.

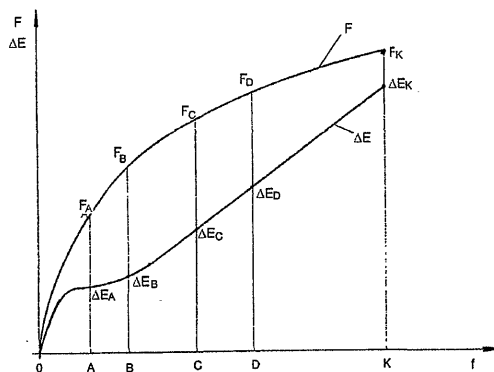


Slika 12. Izgled epruvete za ispitivanje



Slika 13. Šematski prikaz aparature za određivanje dinamičke J-R krive

Ispituje se uobičajenim postupkom za određivanje parametara mehanike loma, pri čemu se registruje dijagram sila-ugib, ili sila-vreme. S obzirom da je uzorak povezan u kolo istosmerne (ili nazimene) struje na način kako je to opisano na sl.11, istovremeno se prati i promena pada potencijala. Na taj način se dobija dijagram, koji u uobičajenoj formi izgleda kao na sl.14. Tako dobijeni dijagrami sila-ugib i pad potencijala-ugib se mogu iskoristiti za dobijanje niza tačaka J- integral i pad potencijala. Postupak dobijanja tačaka je opisan na sl.14. Ordinatatama u tačkama A, B, C, D, ... K, dobijaju se preseči dijagrama sila-ugib u tačkama  $F_A, F_B, F_C, \dots, F_K$  odnosno preseči dijagrama pad potencijala-ugib u tačkama  $\Delta E_A, \Delta E_B, \Delta E_C, \dots, \Delta E_K$ .



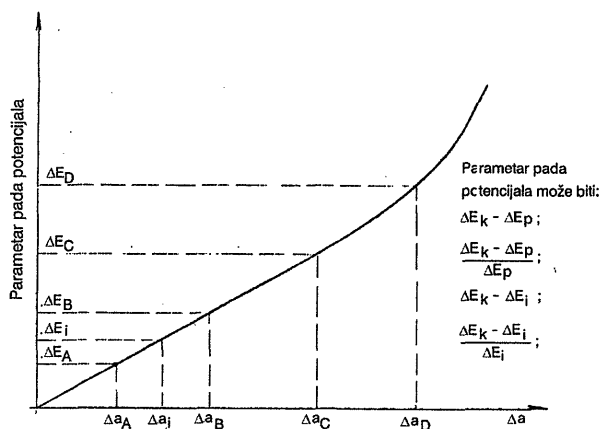
Slika 14. Postupak dobijanja tačaka J-ΔE

S obzirom da je površina ispod krive sila-ugib ukupna energija utrošena tokom ispitivanja, jasna je namera da se ovom podelom eksperimentalnog dijagrama dobije veći broj tačaka za koje će se računati trenutne vrednosti utrošene energije tokom ispitivanja do tačaka  $F_A, F_B, F_C, \dots, F_K$ .

Ugibu u tački  $A$  odgovara sila  $F_A$ , dok je utrošena energija za tu vrednost ugiba jednaka površini između tačaka  $O-A-F_A$ , što odgovara:

$$U_A = \int_0^{f_A} Fdf \quad (10)$$

Na osnovu izračunate vrednosti  $U_A$ , uz poznate veličine  $B$ ,  $W$  i  $a$ , primenom izraza (7) može se dobiti vrednost  $J_A$  koja odgovara ugibu  $A$ . Sa dijagrama na sl.14 za istu vrednost ugiba  $A$  dobija se pripadajuća vrednost pada potencijala  $\Delta E_A$ . Ako se raspolože sa kalibracijom pad potencijala-dužina prsline (sl.15), lako se može odrediti koji prirast dužine prsline ( $\Delta a_A$ ) odgovara vrednosti pada potencijala  $\Delta E_A$ , odnosno ugibu  $A$  i integralu  $J_A$ . Na taj način se dobija prvi par vrednosti  $J_A-\Delta a_A$ , koji će poslužiti za konstrukciju krive otpornosti.



Slika 15. Kalibracija pad potencijala-dužina prsline

Isti postupak se primeni više puta (za vrednosti ugiba  $C$ ,  $D$ , ...,  $K$ ) pri čemu se na opisani način odrede parovi vrednosti  $J_B-\Delta a_B$ ,  $J_C-\Delta a_C$ ,  $J_D-\Delta a_D$ , ...,  $J_K-\Delta a_K$ .

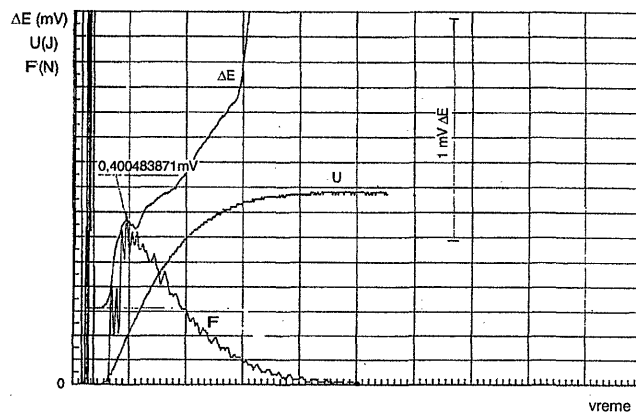
Na ovaj način, ispitivanjem jednog uzorka, uz korišćenje potencimetrijske metode, dobija se niz parova vrednosti  $J_i-\Delta a_i$  na bazi kojih se konstruiše kriva otpornosti. Kada se govori o kalibracionoj zavisnosti promene pada potencijala od dužine prsline, za dati materijal i geometriju uzorka ne predstavlja poseban problem ostvariti reproduktivne rezultate sa stepenom korelacije većim od 0,96 [18].

Ispitivanja radi određivanja dinamičke  $J-R$  krive su obavljena na instrumentiranom Šarpi klatnu, pri čemu je pored promene sile i energije u funkciji vremena registrovana i promena potencijala tokom ispitivanja. Primenjena aparatura je šematski prikazana na sl.13.

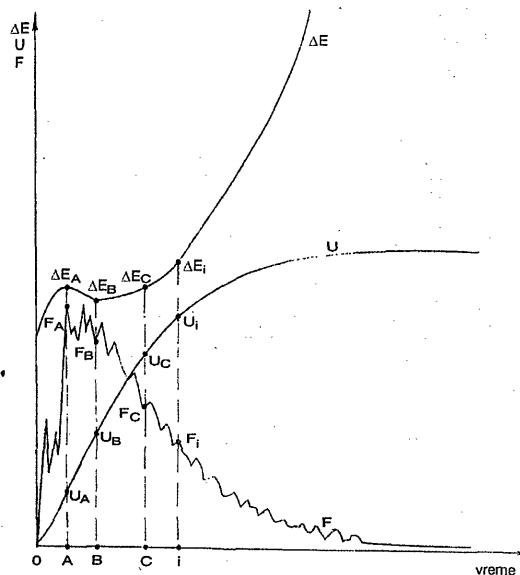
Karakteristični dijagram promene sile, energije i električnog potencijala u funkciji vremena, za uzorak čelika HY-100, je prikazan na sl.16.

Principijelni postupak dobijanja više parova vrednosti  $J-\Delta a$  sa dijagrama promene sile, energije i potencijala u funkciji vremena je isti kao i kod ispitivanja pri kome je registrovan dijagram promene sile i potencijala u funkciji ugiba. Na dijagramu (sl.16) se vidi da je, pored registrovanja promene sile i potencijala u funkciji vremena, integrator na instrumentiranom klatnu omogućio direktno očitavanje utrošene energije ( $U$ ).

Ilustracija primenjenog postupka dobijanja parova vrednosti  $J$ - integrala i prirasta prsline, ispitivanjem jednog uzorka je prikazana na sl.17.



Slika 16. Karakteristični dijagrami promene sile, energije i pada potencijala [18]



Slika 17. Postupak dobijanja parova tačaka  $J-\Delta a$

Ordinatama u tačkama  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ..., dobijaju se preseki dijagrama sila-vreme u tačkama  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ...  $F$ , odgovarajući preseki dijagrama pad potencijala-vreme  $\Delta E_A$ ,  $\Delta E_B$ ,  $\Delta E_C$  ...  $\Delta E_i$ , odnosno (za uređaje sa integratorom) i preseki dijagrama utrošena energija-vreme u tačkama  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ...  $U_i$ .

Energija loma,  $U$ , se izračunava primenom jednačine:

$$U = \int_0^t F(t)v(t)dt \quad (11)$$

gde su:  $F(t)$ - promena sile u funkciji vremena,  $v(t)$ - promena brzine klatna za vreme loma,  $t$ - vreme trajanja loma.

Uvođenjem preseka po ordinatama u tačkama  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ..., namera je da se veštačkom podelom jednog eksperimentalnog dijagrama dobije veći broj tačaka za koje će se izračunavati vrednost  $J$ - integrala. Za uzorak koji se ispituje savijanjem u tri tačke, izračunavanje vrednosti  $J$ - integrala se obavlja primenom poznatog obrasca (12):

$$J = \frac{2U}{B(W-a)} \quad (12)$$

gde su:  $U$ - utrošena energija,  $B$ - debljina epruvete,  $W$ - širina epruvete,  $a$ - trenutna dužina prsline.

Za presek po ordinati u tački  $A$  (sl.17) može se direktno odrediti utrošena energija loma po tački  $A$ ,  $U_A$ , s obzirom da

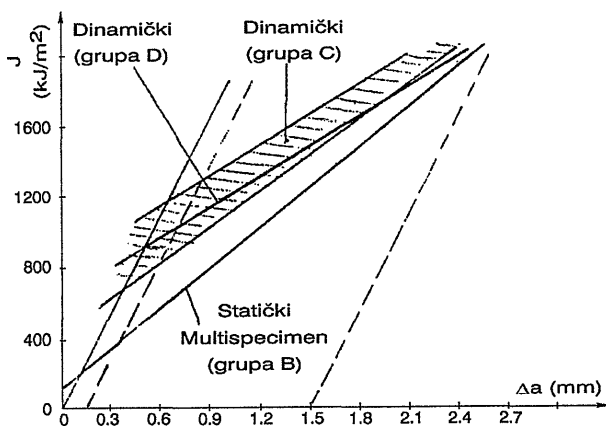


instrumentirano klatno na kome su obavljena ispitivanja ima ugrađen integrator. U suprotnom, bilo bi neophodno da se sva energija računa primenom jednačine (11). Trenutna dužina prsline u tački  $A$  može se odrediti primenom kalibracije promene potencijala-dužine prsline na osnovu poznate vrednosti promene potencijala. U ovom slučaju za tačku  $A$  to je  $\Delta E_A$ , vrednost koja se, takođe, očitava sa dijagrama.

Na osnovu očitane vrednosti  $U_A$  i određene vrednosti  $\Delta Q_A$ , odnosno dužine prsline  $a$ , primenom jednačine (12) se dobija prvi par vrednosti  $J_A$  i  $\Delta a_A$ , koji će poslužiti za konstrukciju krive otpornosti.

Ponavljanjem istog postupka za vrednosti ugiba koje odgovaraju vremenu loma u tačkama  $B$ ,  $C$  ili  $i$ , mogu se odrediti i drugi parovi vrednosti  $J_B$ - $\Delta a_B$ ,  $J_C$ - $\Delta a_C$  ...  $J_i$ - $\Delta a_i$ , na osnovu kojih se konstruiše dinamička  $J$ - $\Delta a$  kriva ispitivanjem jednog uzorka.

Na sl.18 je prikazan zbirni dijagram za seriju ispitivanja obavljenih na uzorcima od čelika visoke čvrstoće, komercijalne oznake NN-70, a koji je jugoslovenska verzija čelika klase HY-100. Ispitivanja su bila obavljena na uzorcima iste geometrije i to u statičkim i dinamičkim uslovima delovanja sile.



Slika 18. Oblast dinamičkih krivih otpornosti za čelik HY-100 [18]

### Analiza postupaka i diskusija

Iako je osnovni cilj ovog rada da prikaže i objasni postupke određivanja dinamičkih krivâ otpornosti, potrebno je osvrnuti se na dobijene rezultate ispitivanja.

U ovom radu su prikazani rezultati određivanja dinamičkih krivâ otpornosti za različite materijale i to dobijenih primenom različitih nestandardnih postupaka ispitivanja. U tabeli 1 je dat hemijski sastav i nivo napona na granici tečenja za ispitivane materijale.

Tabela 1. Oznaka, hemijski sastav i napon na granici tečenja ispitivanih materijala

Oznaka čelika	Hemijski sastav					Napon na granici tečenja	
	tež. (%)					(MPa)	
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	
BS 4360-50D	0,14	1,3	0,30				400
BS 1501-271	0,17	1,43	0,3	0,48		0,33	400
20MnMoNi	0,20	1,38	0,24	0,52		0,3	534
HY-100	0,11	0,23	0,2	3,1	1,24	0,29	780
HY-130	0,10			4,94	0,5		902

Kvantitativna komparacija rezultata, odnosno položaja dinamičkih krivâ otpornosti, praktično nije moguća, s obzirom da su ispitivanja obavljena na različitim materijalima i

uz to primenom različitih postupaka ispitivanja. Međutim, vidljiva je zakonitost u smislu da je položaj dinamičkih krivâ otpornosti iznad statičkih, što se jasno vidi na sl. 5,9,10 i 18. U svim razmatranim slučajevima vrednost dinamičkog  $J$ -integrala je veća u odnosu na korespondentnu statičku vrednost za istu veličinu prirasta prsline. Dinamička kriva otpornosti obuhvata površinu iznad statičke. Što se nagiba tiče, dinamička kriva je nešto strmija u odnosu na statičku.

Ovakvi rezultati se potpuno slažu sa teorijskim razmatranjima o uticaju brzine opterećenja i promene temperature na vrhu zareza tokom dinamičkog delovanja sile na dinamički faktor intenziteta napona, dinamički  $J$ -integral, a time i na položaj dinamičke krive otpornosti [8,15-17,19,21].

Generalno, što se primenjenih tehnika tiče, autori, predlagači i istraživači zaključuju, a dobijeni rezultati pokazuju, da su postupci u dobroj meri pouzdani i daju reproduktivne rezultate. Međutim, jasno je da svaka od primenjenih tehnika određivanja dinamičke krive otpornosti ima svojih prednosti i nedostataka.

Na prvi pogled sam postupak ispitivanja u području prelaznih temperatura je najjednostavniji, jer za njegovo izvođenje nije potrebna specijalna oprema. Osnovni problem kod ove metode je što je njena primena ograničena samo na ispitivanje čelika i to na niskim temperaturama. Pri tome ne treba izgubiti iz vida svu složenost ponašanja materijala u oblasti prelaznih temperatura. S druge strane, zanemarivanje razlika u temperaturi ispitivanja na uzorcima iz iste serije ispitivanja svakako nepovoljno utiče na tačnost merenja. Kada se razmatraju nedostaci, svakako treba naglasiti da je u pitanju metoda gde se kriva otpornosti dobija ispitivanjem više uzoraka.

Postupak po Čiperfildu se može primeniti kod mnogih materijala. Ispitivanja se mogu obaviti na Šarpi klatnu, padajućem tegu ili servohidrauličnoj kladnici, pri čemu se osim standardne instrumentacije udarnog trna ne zahteva posebna oprema. Za pouzdane rezultate visoka preciznost mašinske obrade, posebno kod malih vrednosti ispusta, se postavlja kao imperativ. Međutim, pored toga što i ovaj postupak koristi više uzoraka, osnovni nedostatak je pojava prirasta prsline i nakon prolaska uzorka između oslonaca zbog zaostale energije rotacije u epruveti. Na taj način se dovodi u pitanje tačnost rezultata, jer izmereni prirast prsline nije posledica samo utrošene energije. Drugi problem je česta pojava iskliznuća uzorka posebno kod malih ispusta, što utiče na tačnost merenja.

Sa stanovišta tačnosti merenja, najveći problem se javlja kod postupka udara tegom do graničnika, zbog toga što se pri izvođenju opita registruje ukupno apsorbovana energija koja se sastoji od zbira energije za rast prsline i energije za deformaciju bloka (kočnice). Razdvajanje ove energije na sastavne činioce u praksi predstavlja problem. Znači, u nedostatke ovog postupka, pored činjenice da se i on bazira na ispitivanju više uzoraka, spadaju i aproksimacije u računanju energije utrošene za deformaciju bloka. Prednost ove tehnike je, svakako, što se može primeniti na razne materijale.

I postupak smanjene energije se može primeniti na širok spektar materijala. Međutim, problem su neujednačeni uslovi ispitivanja uzoraka iz iste serije, jer se različit prirast prsline postiže smanjenjem energije ispitivanja. To znači da se svi uzorci, koji se ispituju radi konstruisanja krive otpornosti, ispituju pod različitim uslovima, pri čemu se menja ili brzina udara tega u uzorak ili težina tega.

Postupak određivanja krive otpornosti primenom potencimetrijske metode ima prednost u odnosu na već nabrojane tehnike u tome što se dinamička kriva otpornosti dobija



ispitivanjem jednog uzorka koji se kontinuirano lomi. Nedostatak ove tehnike je što se ona bez problema može primeniti na ispitivanje elektroprovodnih materijala, što se izvodi uz pomoć osetljive opreme za merenje promene potencijala i što je neophodno raspolagati kalibracijskom zavisnošću dužina prsline-promena potencijala. Pored svih nabrojanih nedostataka, činjenica da se radi o postupku gde se ispitivanje obavlja na jednom uzorku daje ovoj tehnici prednost u odnosu na ostale tehnike, posebno u slučajevima gde se ispitivanja obavljaju na nehomogenim materijalima. To znači da se ova metoda, praktično jedina, može primeniti kod ispitivanja zavarenih spojeva ili ocene zavarljivosti materijala.

### Zaključak

Dinamička kriva otpornosti, kao pokazatelj otpornosti materijala prema stabilnom rastu prsline u dinamičkim uslovima delovanja sile, se može uspešno konstruisati primenom bar pet tehnika. Na osnovu obimnog literaturnog pregleda i iskustva, zaključuje se da su u pitanju relativno jednostavne metode, koje su se pokazale kao reproduktivne. Dobijeni rezultati u svim analiziranim slučajevima su tehnički logični i imaju potvrdu u teorijskim razmatranjima o očekivanom ponašanju materijala u uslovima udarnog delovanja sile.

Sve opisane tehnike imaju svoje prednosti i mane, pa se ne može jednoznačno tvrditi da neka od njih ima apsolutnu prednost.

Zajednički imenitelj metode po Čiperfildu, tegom do graničnika, smanjenjem energije ili ispitivanjima u području prelaznih temperatura je što su u pitanju ispitivanja na više uzoraka.

Pored toga, kod ispitivanja u oblasti prelaznih temperatura i ispitivanjem smanjenom energijom javlja se problem različitih uslova izvođenja opita, dok se kod ispitivanja tegom do graničnika i ispitivanju po Čiperfildu uvodi i aproksimacija, kao nedostatak.

I pored svega, određivanje dinamičke krive primenom potencimetrijske metode za praćenje rasta prsline ima prednost u odnosu na ostale postupke u činjenici da je to jedina metoda kod koje se ispitivanje obavlja na jednom uzorku. U slučaju ispitivanja zavarenih spojeva ili ocene zavarljivosti, ova prednost može biti odlučujuća.

Na kraju, kao opšti zaključak se nameće neophodnost nastavka rada na razradi, unapređivanju i proveru svih metoda opisanih u literaturi, sa ciljem da se dođe do nekog opšteprihvaćenog ili standardizovanog postupka.

### Literatura

- [1] MAC GILLIVRAY, H.J., AKUM, E.R., BROOKS, J.P., GRABULOV, V. *Developments in Measuring Techniques for High rate Dynamic Fracture Testing*. International conference on Advanced Measurement Techniques, London, 1987.
- [2] DRENIĆ, D. *Analiza razvoja prsline pri dejstvu udarnog opterećenja u čeliku visoke čvrstoće*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš, 1982.
- [3] KANAZAWA, T., MACHIDA, S., TERAMOTO, T. *Preliminary Approaches to Experimental and Numerical Study on and Crack Arrest*. ASTM STP 627.
- [4] MARANDET, B., PHELIPPEAU, G., SANZ, G. *Experimental determination of Dynamic fracture toughness by J-integral method*.
- [5] TANAKA, M., UMEKAWA, S. *On the Breaking Behaviour in Charpy Impact Bending Tests*. Proceedings, 1st Japan Congress for Testing Materials, 95, 1958.
- [6] RADON, J.C., TURNER, C.E. Fracture Toughness Measurements by Instrumented Impact Test. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, 1969, vol.1, no.3, p.411-428.
- [7] SERVER, W.L., TETELMAN, A.S. The Use of Precracked Charpy Specimens to Determine Dynamic Fracture Toughness. *Eng Fract. Mech.*, 1972, no.4, p.367.
- [8] KOBAYASHI, T., YAMAMOTO, I., NINOMI, M. Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test. *Eng Fract. Mech.*, 1986, vol.24, no.5, p.733-782.
- [9] MAC GILLIVRAY, H.J., GRABULOV, V. *Razvoj postupka merenja pada potencijala jednosmerne struje za ispitivanje J-R krive na epruvetama Šarpi*. zbornik radova, Međunarodno savetovanje, "Zavarivanja i konstruisanje", Beograd, 1987.
- [10] CURR, R.M., MAC GILLIVRAY, H.J., TURNER, C.E. *A Comparison of Some Elasto-plastic Finite Element, Experimental Data and Some Simple Models for Notched Bars and Plates*. IMechE Seminar on Dynamic Fracture Mechanics, London, 1986.
- [11] BÖHME, W. *Experimentelle Untersuchungen zum elastisch-plastischen Bruchverhalten eines Druckbehälterstahls unter dynamischer Beanspruchung*. Scientific Report W 3/89, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg, January 1989.
- [12] BÖHME, W. *Rapid Load Fracture Testing*. ASTM STP 1130, 1992, p.92-103.
- [13] MCCONNELL, P., SERVER, W.L. *Epi Instrumented Impact Test Procedures*. CSNI Specialists Meeting on Instrumented Precracked Charpy Testing, Palo Alto, California, 1985.
- [14] LENKEY, G.Y.B., MAJOR, Z., VIENHRING, H.W. *The dynamic calibration problems in instrumented impact testing*. Proceedings of the 9th European Conference on Fracture ECF-9, Varna, Bulgaria, 1992, p.321-324.
- [15] GLOVER, A.P., JOHNSON, F.A., RADON, J.C., TURNER, C.E. *Dynamic Fracture Toughness Measurement by Instrumented Impact Bend Testing and Compact K Testing*. Welding Institute ASM Int Conf on Dynamic Fracture Toughness, 1977, no.1, p.63-75.
- [16] BASSIM, M.N., BAYOUMI, M.R., HSU, T.R., MATTHEWS, J.R. Investigation of Dynamic  $J_{1d}$  for Alloy Steel Weldments using the Split Hopkinson Bar. *Journal of Testing and Evaluation*, 1986, vol.14, no.5, p.229-235.
- [17] MAC GILLIVRAY, H.J., TURNER, C.E. *A Comparison of Dynamic R-Curve Methods*. Fourth International Conference on the Mechanical Properties of Materials at high Rates of Strain, Oxford, March 1989.
- [18] GRABULOV, K.V. *Određivanje parametara krive otpornosti primenom potencimetrijske metode za merenje rasta prsline*. doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1995.
- [19] CHIPPERFIELD, C.G. 1977 TWI/ASM Int Conf of Dynamic Fracture Toughness, 1, p. 169-179.
- [20] OHTSUKA, J. privatna komunikacija.
- [21] MAC GILLIVRAY, H.J., TROIANOS, D., BRAGA, L. *A Comparison of two Dynamic J-R test Methods*. For the ESIS TCS Committee First Round-Robin Programme, Miškolc, 1995.
- [22] CURRY, D.A., MILNE, I., GATES, R.L. 1982 CERL Report RD/ILJ/2197-N81.
- [23] JOHNSON, H.H. Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth. *Materials Research and Standards*, 1965, vol.5, p.442-445.
- [24] GILLE, G. The electrical potential method and its application to non-destructive testing. *Non destructive testing*, February 1971, vol.4, p.36-44.

Rad primljen: 8.7.1999.god.