

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DINAMIČKE ŽILAVOSTI LOMA K_{Id} , KOD METALNIH MATERIJALA VISOKE ČVRSTOĆE

Experimental determination of dynamic fracture toughness K_{Id} in metal materials with high strength

Mr Meri Burzić, dipl. inž, istraživač saradnik, Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd
Prof. dr Stojan Sedmak, Tehnološko-metalurški fakultet, Kardedžijeva 4, Beograd
Dr Zijah Burzić, dipl. inž, Viši naučni saradnik Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd
Mr Milorad Zrilić, dipl. inž, Tehnološko-metalurški fakultet, Kardedžijeva 4, Beograd
Mr Dragan Jaković, dipl. inž, IMS Institut, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd
Mr Dejan Momčilović, dipl. inž, IMS Institut, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd



Rezime

U ovom radu su prikazane metode za određivanje dinamičke žilavosti loma, K_{Id} . Metode dinamičkog J integrala, i ekvivalenta energije su eksperimentalno potvrđene ispitivanjem čelika Č 5432 i Č 4734. Ovaj rad predstavlja doprinos u ovladavanju metodama koje definišu ponašanje materijala u dinamičkim uslovima rasta prsline. Primena ovih metoda zajedno sa ostalim metodama za određivanje parametara mehanike loma predstavlja značajan doprinos istraživanju ponašanja konstrukcijskih materijala u prisustvu prsline.

Ključne reči:

dinamička žilavost loma, instrumentirano udarno ispitivanje, dinamička ispitivanja, dinamički J integral

Abstract

In this paper the investigation of methods for determination of dynamic fracture toughness, K_{Id} . Dynamic J -integral and equivalence energy methods are experimental confirm testing of steel Č 5432 and Č 4734. This paper presented of contribution in control methods what's to define behaviour of materials in condition of dynamic crack growth. Application this all methods presented very imported contribution of investigation behaviour construction materials in presence of crack.

Key words:

dynamic fracture toughness, instrumented impact testing, dynamic testing, dynamic J -integral

1. UVOD

Praktičnoj primeni savremenih konstrukcijskih materijala treba da prethodi detaljno proučavanje njihovih mehaničkih i eksploatacijskih svojstava, kako bi se sigurnost delova konstrukcije, a time i integritet konstrukcije u celini, obezbedili u potpunosti na nivou već dostignute sigurnosti, ili čak na višem nivou.

Kao polazni podatak o primenljivosti služe karakteristike koje se dobijaju zateznim ispitivanjem (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje pri lomu), a one su i osnova za konstruisanje delova. Ove karakteristike opisuju globalno mehaničko ponašanje, koje se dobija ispitivanjem glatkih epruveta. Zbog toga se pri proračunu napona pretpostavljaju homogenost materijala i ravnomerna raspodela napona po preseku, pa se koriste osnovne formule otpornosti materijala [1].

Za eksploatacijsku sigurnost konstrukcije izložene promenljivom opterećenju najvažnije su karakteristike koje opisuju pojavu i rast prsline. Opšte prihvaćena karakteristika u tom slučaju je zamorna čvrstoća, koja određuje nivo napona pri kome ne dolazi do pojave prsline pri promenljivom opterećenju. U skladu sa tim, projektovanje delova konstrukcija na osnovu zamora materijala zasnovano je na korišćenju zamorne čvrstoće i iskustvenim preporukama, izvedenim iz analize otkaza delova u eksploataciji i obimnih ispitivanja.

Pojava zamorne prsline uslovljava da se dalje ponašanje materijala oko vrha prsline razmatra na osnovu mikromehaničkog aspekta umesto globalnog aspekta, koji je primenljiv na glatke i homogene konstrukcijske oblike delova.

Međutim, i pored strogih uslova za kvalitet delova u pogledu njihove proizvodnje i kontrole, greške se ne mogu u potpunosti isključiti, pa ni kratke prsline, kao najopasnije greške. Jedan od osnovnih razloga uvođenja delova sa greškom u eksploataciju se pripisuje nedovoljnoj osetljivosti opreme za kontrolu i ispitivanje bez razaranja. Inicijacija kratkih prsline i njihov rast uslovljavaju da mikromehanički aspekt ponašanja materijala postaje bitan za ocenu eksploatacijske sigurnosti konstrukcijskih delova. Puni zamah u analizi ponašanja prsline pri dejstvu opterećenja je

omogućila mehanika loma, definisanjem faktora intenziteta napona K , kao parametra koji opisuje singularitet naponskog polja oko vrha prsline.

Osnovni napredak koji je mehanika loma napravila u oblasti zamora materijala je u analitičkom rasčlanjavanju fenomena loma usled zamora na period inicijacije, u kome zamorna prsline nastaje, i na period rasta ili širenja koji mu sledi i u kome se nastala prsline povećava do kritične veličine pri kojoj dolazi do naglog loma [2].

Mnoge komponente i delovi konstrukcija su u toku eksploatacije izloženi udarnom opterećenju ili slučajnom trenutnom preopterećenju. Tu spadaju, pre svega, transportna sredstva, brodovi, železničke šine, morske platforme, mostovi, nuklearna postrojenja, delovi motora. Lomne karakteristike konstrukcijskih materijala umnogome zavise od brzine deformisanja, pri čemu treba očekivati da žilavost opada sa porastom brzine delovanja opterećenja. Zbog toga postoji značajan interes za kvantificiranje otpornosti materijala prema stvaranju i rastu prsline pri dinamičkim uslovima delovanja sile.

Za ocenu ponašanja materijala u dinamičkim uslovima delovanja sile merodavni su dinamički parametri mehanike loma, žilavost loma u dinamičkim uslovima, K_{Id} , i dinamička kriva otpornosti. Jedna metoda ispitivanja materijala, koja se primenjuje već sto godina, je preteča ovih ispitivanja. Reč je o empirijskoj eksperimentalnoj metodi za karakterizaciju metalnih materijala, čija je suština korišćenje energije udara za lom epruvete sa zarezom, unetim radi koncentracije naprezanja. Ova metoda, metoda po Šarpiju [3], ili kako se još naziva u stručnoj literaturi, metoda za određivanje udarne žilavosti ili energije loma pri udarnom opterećenju, omogućava brzu i relativno jeftinu ocenu ponašanja materijala tokom loma. Iako je metoda po Šarpiju uvedena početkom prošlog veka, svoju punu potvrdu je dobila tokom Drugog svetskog rata i u godinama neposredno nakon njega, kada su učestali katastrofalni otkazi konstrukcija izrađeni od čelika povišene čvrstoće. Pokazalo se da je uzrok tih otkaza upravo pojava koncentratore naprezanja i inicijacije prsline. Značajni doprinos u proširenju primene ispitivanja epruveta sa zarezom dao je rad Grina i Handija [4], koji su metodom linija klizanja teorije plastičnosti objasnili razvoj plastične deformacije oko vrha zareza.

Početkom šezdesetih godina prošlog veka, ovoj metodi se pristupa na osnovu novih prilaza i razmišljanja. Šarpi klatno se oprema osciloskopom

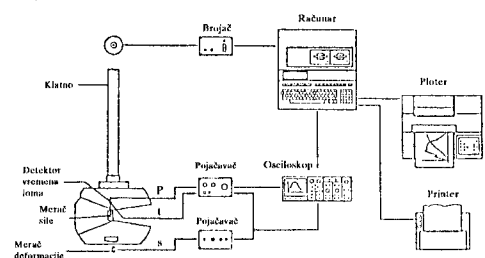
(tzv. instrumentirano klatno) [5], a nova razmišljanja su usmerena na epruvete sa prsline na principima mehanike loma [6]. Upravo na osnovu instrumentiranog Šarpijevog klatna i saznanja iz mehanike loma, metoda određivanja energije udara dobija novu primenu u određivanju dinamičkih parametara mehanike loma, koji sve više postaju značajni parametri proračuna sigurnosti konstrukcija [7].

2. ISPITIVANJE SAVIJANJEM UDARNIM DEJSTVOM SILE NA EPRUVETAMA SA ZAREZOM

Veliki broj delova mašina i konstrukcija izložen je u toku rada udarnim naprezanjima. Karakteristike materijala pri udarnim opterećenjima razlikuju se od karakteristika dobijenih statičkim dejstvom sile; stoga je razumljiva potreba za njihovim određivanjem.

Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom može da pruži i objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju, tj. pri prostornom naponskom stanju. Određivanje energije (rada) potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala, kao i njegove obrade. Ovim postupkom ispitivanja može se utvrditi sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije (starenje).

Pri ispitivanju savojnim udarnim opterećenjem energija loma određuje se kao integralna veličina. Tako određena energija loma ne daje mogućnost razdvajanja otpornosti materijala prema stvaranju, odnosno širenju prsline. Da bi se to postiglo udarna sila i vreme treba da budu kontinualno zapisivani tokom ispitivanja, što je moguće izvesti instrumentiranjem klatna. Shema savremenog instrumentiranog klatna je data na sl. 1.



Slika 1. Shematski prikaz savremenog instrumentiranog klatna

Praćenje promene sile sa vremenom omogućava da se sazna više o tome da li je utrošeni rad za lom uzorka posledica delovanja niske vrednosti sile na duže vreme, ili kratkotrajnog delovanja visoke

vrednosti sile, što je bitno za ocenu ponašanja materijala.

2.1. Dijagram sila - vreme

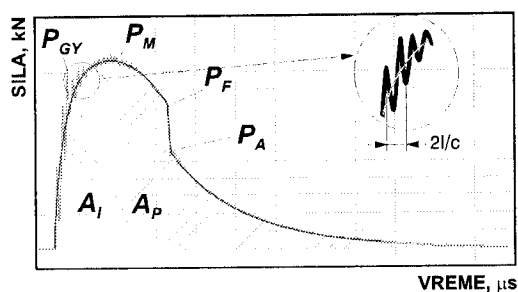
Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom. Tako dobijen dijagram sila - vreme, sl. 2, omogućava određivanje sledećih podataka [8]:

P_{GY} - dinamička sila napona tečenja; određuje se na mestu zakrivljenja dijagrama, tj. na prelaznoj tački od linearne ka nelinearnoj zavisnosti sila-vreme. Ona služi u prvoj aproksimaciji kao mera plastičnog popuštanja ligamenta uzorka.

P_M - maksimalna sila na krivoj sila - vreme.

P_F - sila početka nestabilnog rasta prsline; određuje se kao sila na preseku glatke krive i strmo padajućeg dela krive sila-vreme.

P_A - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline.



Slika 2. Tipičan dijagram sila-vreme dobijen na instrumentiranom klatnu [8]

Kada se strmi pad sile podudara sa maksimalnom silom, onda je $P_M = P_F$. Sila P_A se određuje kao presek strmog pada krive sila - vreme i glatke krive koja osciluje.

Definisane sile na sl. 2 odgovaraju deformacijama koja nose iste indekse kao ove sile. Dodatno se definiše deformacija S_T na kraju krive sila - deformacija.

Iz dijagrama sila - vreme, sl. 2, moguće je izračunati energiju A , potrebnu za lom uzorka:

$$A = \int_0^{t_l} P(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad 1.$$

gde je:

$P(t)$ - sila, koja se menja sa vremenom;

$v(t)$ - promena brzine klatna za vreme loma;

t - vreme trajanja loma.

Da bi se povećala sposobnost prikaza energije udara, ova se mora rastaviti na sastavne komponente, silu i deformaciju (ugib epruvete). Ugib se određuje iz zavisnosti sila-vreme. Veza između sile i vremena je proporcionalna karakteristikama ubrzanja. Koristi se kruti teg mase m , početne brzine udara v_0 , a deformacije počinju u trenutku vremena t_0 . Ugib se proračunava dvostrukom integracijom.

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad 2.$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P(t) dt \quad 3.$$

2.2. Razdvajanje ukupne energije udara na sastavne delove

Za celovitiju ocenu ponašanja materijala pri udarnom opterećenju potrebno je znati koji se deo energije troši za stvaranje prsline, a koji deo za širenje prsline. Postoji više metoda kojima se može razdvojiti ukupna energija udara, A_{uk} , na energiju za stvaranje prsline, A_I , i energiju za širenje prsline, A_P . Većina njih se zasniva na tome da energija za stvaranje prsline ne zavisi od radijusa zareza, već da radijus utiče na energiju za širenje prsline.

Najprihvatljiviji postupak određivanja energije širenja prsline je preko "zamorne prsline". Suština ovog postupka je u tome da se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prsline, pa se takva epruveta lomi na [arpi klatnu i energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline, A_P . Ukoliko je poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda može da se izračuna deo energije potrebne za stvaranje prsline, A_I :

$$A_I = A_{uk} - A_P \quad 4.$$

Određivanje energije stvaranja i energije širenja prsline po ovoj metodi obavlja se na jednom uzorku (za razliku od drugih postupaka), što daje veću tačnost. Na dijagramu sila - vreme, sl. 2 obeležene su površine A_I i A_P koje su proporcionalne energijama stvaranja i širenja prsline [8].

Treba napomenuti da se iz dijagrama sila - vreme mogu odrediti i sila na granici tečenja, maksimalna sila i sila krkog loma, kao što je to prikazano na sl. 2. Međutim, treba uzeti u obzir da se u ispitivanju ne iskazuju uvek sve ove sile.

Dva materijala koja imaju jednake vrednosti ukupne energije loma udarom, mogu da imaju različite energije stvaranja i širenja prsline. S tačke gledišta sigurnosti konstrukcije bolji je onaj materijal koji ima malu energiju stvaranja prsline, a veliku energiju širenja prsline.

U zavisnosti od vrste ispitivanog materijala, temperature ispitivanja, režima termičke obrade, ispitivanjem na instrumentiranom klatnu mogu da se dobiju različiti tipovi zavisnosti sila - vreme, odnosno sila - ugib.

3. DINAMIČKI FAKTOR INTENZITETA NAPONA K_{Id}

Primena instrumentiranog klatna omogućava ocenu ponašanja materijala sa prslinom u dinamičkim uslovima, za koju su merodavni dinamički parametri mehanike loma. To su dinamički faktor intenziteta napona K_{Id} , i dinamička kriva otpornosti. Za ta ispitivanja nema jasno definisanog standarda, već se koriste preporuke, koje su rezultat obimnih eksperimentalnih istraživanja [9].

Temperatura ispitivanja i brzina rasta nestabilne prsline su dve međusobno povezane veličine, pa kritični dinamički faktor intenziteta napona ili dinamička žilavost loma, K_{Id} , može da se izračuna pomoću zavisnosti date u obliku [10]:

$$K_{Id} = \left(T, \frac{v_0}{v_{kr}} \right) \quad 5.$$

gde je:

T - temperatura ispitivanja,

v_0 - karakteristična brzina prostiranja talasa kroz materijal,

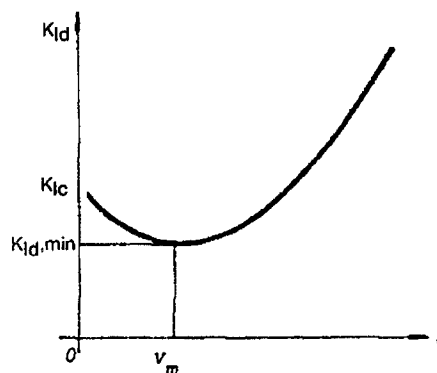
v_{kr} - brzina rasta nestabilne prsline.

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 opterećenju faktor intenziteta napona biti različit od faktora intenziteta napona utvrđenog ispitivanjem standardnim metodama (ASTM E399). To upućuje na potrebu da se definiše dinamički

faktor intenziteta napona koji zavisi od brzine dejstva opterećenja i brzine razvoja prsline, v .

Na sl. 3. data je tipična zavisnost faktora intenziteta napona od brzine rasta prsline. Pri brzini razvoja prsline $v = 0$ faktor intenziteta napona odgovara žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} :

$$K_{Ic} = K_{Id} \quad \text{kada } v \rightarrow 0 \quad 6.$$

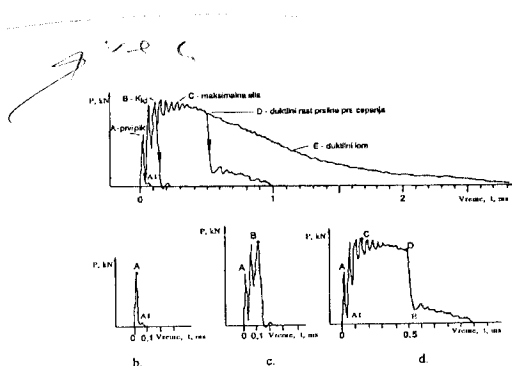


Slika 3. Zavisnost dinamičkog faktora intenziteta napona K_{Id} od brzine rasta prsline v

Da bi veličina K_{Id} bila parametar, koji karakteriše ponašanje materijala, 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 i kritičnu veličinu faktora intenziteta napona pri udarnom opterećenju.

Server i Tetelman [11], kao i Kobajaši [12], su za određivanje kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona K_{Id} koristili podatke dobijene ispitivanjem epruveta na instrumentiranom klatnu. Za to ispitivanje je potrebno na određeni način registrovati silu koja je potrebna za lom epruvete i vreme za koje se taj lom obavi. Isto tako je važno registrovati i ugib, odnosno put koji klatno pređe od momenta kontakta sa epruvetom do njenog konačnog loma.

Dijagram, dobijen pri udarnom ispitivanju Šarpi epruvete sa V zarezom za tipični duktilni lom je prikazan na sl. 4a (kriva E) [13]. Na istoj slici su ucrtana tri dijagrama, sl. 4b, c i d, koja predstavljaju tri oblika loma.



Slika 4. Karakteristični dijagrami sila-vreme

Dijagram se sastoji od oscilujućih talasnih oblika, čija amplituda dostižu maksimum, a zatim se polako smanjuje (sl. 4a). Veličina oscilacije prvog opterećenja zavisi uglavnom od sile inercije epruvete, a mnogo manje od njene žilavosti [11], tako da se ponašanje materijala koje odgovara tački A dijagrama ne može direktno analizirati (sl. 4b), već je potrebna korekcija zbog sile inercije [12]. Druga mogućnost za smanjenje uticaja sile inercije je ispitivanje sa smanjenom brzinom klatna ("Low-blow" test) [14, 15]. U ovom slučaju pored smanjenja sile inercije smanjuje se i brzina delovanja opterećenja.

Određivanju veličine kritičnog opterećenja loma P_K treba posvetiti posebnu pažnju. Na sl. 4d prikazan je dijagram sila - vreme za duktilno-krt lom, dobijen ispitivanjem epruvete sa zamornom prslinom. Ovaj dijagram odlikuje niz karakterističnih tačaka, čiji položaj zavisi od ispitivanog materijala i uslova ispitivanja.

Udarno savijanje na klatnu počinje prvim kontaktom klatna i epruvete. Taj kontakt se ostvaruje na delu krive od tačke 0 do A (sl. 4d). Posle prvog kontakta klatna i epruvete sila trenutno opada, tačka A1, jer se kontakt za trenutak gubi. Ove tri tačke definišu pik inercije koji se obavezno javlja pri svakom lomu epruvete. Vrednosti sile u tački A i A1 mogu precizno da se očitaju sa oscilograma [16]. U nastavku procesa ispitivanja epruvete klatno ostvaruje stalni kontakt sa epruvetom: od tačke A1 do tačke B materijal se u zoni vrha inicijalne prsline elastično deformiše. U tački B stvorena inicijalna prslina počinje da se širi upravo na pravac dejstva sile, po čitavom preseku epruvete, sve do tačke C. U tački C počinje stabilni rast prsline u pravcu dejstva sile, zonom plastične deformacije ispred vrha prsline, čija veličina zavisi od vrste materijala i uslova ispitivanja. U tački D počinje nestabilan (brzi) rast prsline, što dovodi do naglog pada sile na oscilogramu sila - vreme, sve do tačke E kada se zaustavlja brzi rast i ponovo uspostavlja stabilni rast prsline [16].

Za materijale visoke čvrstoće, kada je zona

plastične deformacije na vrhu inicijalne prsline minimalne veličine, oscilogram sila - vreme ima idealizovani oblik prikazan na sl. 4c. Kritična veličina zone plastične deformacije na vrhu inicijalne prsline se uspostavlja u tački B.

Značajno je napomenuti da je i kod ovog oscilograma prisutna pojava pika inercije, ali za razliku od oscilograma datog na sl. 4d, elastične deformacije se javljaju u tački A i traju do tačke B, nakon čega dolazi do nestabilnog rasta prsline. Ovaj tip oscilograma se koristi za određivanje dinamičkih parametara mehanike loma, polazeći od pretpostavke da na vrhu zamorne prsline osim elastične postoji i samo mala plastična deformacija, koja može da se zanemari.

Kritični dinamički faktor intenziteta napona K_{ld} , odnosno dinamička žilavost loma, se na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata ispitivanja Šarpi epruveta izračunava u obliku [17]:

$$K_{ld} = \left[\frac{6M_s \cdot a^{1/2}}{B \cdot w^2} \right] \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad 7.$$

gde su:

M_s - moment savijanja dat izrazom

$$M_s = \left[\frac{P_K \cdot L}{4} \right] \quad 8.$$

L - rastojanje između oslonaca,

B - debljina epruvete,

a - dužina prsline,

w - širina epruvete,

P_K - kritično opterećenje loma,

$f\left(\frac{a}{w}\right)$ - geometrijski član je funkcija odnosa

dužine prsline a, i širine epruvete w, definisan izrazom:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = 1,99 - 2,47\left(\frac{a}{w}\right) + 12,97\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 23,17\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 24,8\left(\frac{a}{w}\right)^4 \quad 9.$$

Zamenom izraza za M_s u formulu 7 dobija se:

$$K_{ld} = \left[\frac{1,5 \cdot P_K \cdot L \cdot a^{1/2}}{B \cdot w^2} \right] \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad 10.$$

Veličina pika inercije zavisi od:

- modula elastičnosti materijala,
- specifične gustine materijala, i

- brzine kretanja klatna.

Sila inercije P_i , koja odgovara piku inercije, ne može direktno da se odredi sa oscilograma sila - vreme, jer predstavlja samo deo sile očitane na oscilogramu u toj tački. Određuje se tako što se slomljena epruveta spoji glinom ili plastelinom i ponovo ispita na klatnu, pri čemu se dobija oscilogram sila P_i - vreme t_i . Maksimalna vrednost za silu na ovom oscilogramu jednaka je sili inercije P_i . Postupak određivanja sile inercije se ponavlja više puta za svaku epruvetu, a merodavna vrednost je srednja vrednost rezultata merenja.

Maksimalna sila, P_M , je zbir sile inercije i kritičnog opterećenja loma P_K , pri kojoj u materijalu dolazi do nestabilnog rasta prsline. Prema tome, sila kritičnog opterećenja loma P_K se može izračunati iz zavisnosti:

$$P_K = P_M - P_i \quad 11.$$

Maksimalna sila sa oscilograma sila P - vreme t se dobija nakon procesa loma epruvete, direktnim očitavanjem.

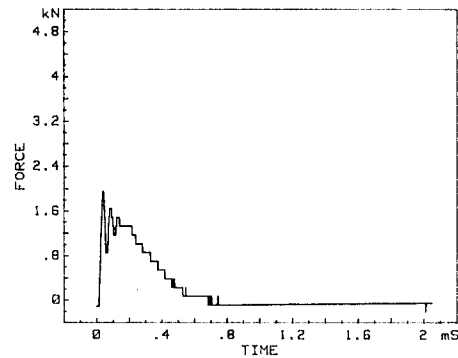
U slučaju linearno elastično-plastičnog ponašanja materijala i značajne plastične deformacije, praćene stabilnim rastom prsline pre nestabilnog rasta, odnosno kada se dostigne tečenje materijala, zakoni linearno-elastične mehanike loma više ne važe pa, u tom slučaju, mora da se primeni energetski pristup zasnovan na J-integralu [18].

Pouzdan način određivanja dinamičkog faktora intenziteta napona na osnovu vremenske zavisnosti sile pri udarnom savijanju na klatnu, K_{Id} , je energetski kriterijum mehanike loma, koje je osnova dve razvijene metode [58]:

- metoda dinamičkog J integrala, i
- metoda ekvivalenta energije.

Za određivanje kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona, K_{Id} , definisan je predlog standarda ASTM E 24.03.03. [19], a značajni doprinos predstavljaju istraživanja Mek Gelivri na Imperijal koledžu u Londonu [20].

Kriterijum za primenjivost metode je oblik oscilograma sila - vreme. Osnovni kriterijum koji mora biti zadovoljen pri ispitivanju udarnim savijanjem je da je vreme do postizanja maksimalne sile, P_{max} , duže ili jednako 0,083 ms, što je prikazano na sl. 5.



Slika 5. Shematski prikaz dijagrama sila - vreme

Postupak određivanja kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona, K_{Id} , kod materijala koji pri udarnom savijanju pokazuju izraženu plastičnu deformaciju je složen, jer se zahteva upotreba korekcijskih faktora ponašanja uređaja i epruvete u toku ispitivanja. Ti korekcijski faktori, koji definišu meru energije elastične deformacije površinskih slojeva noža klatna i epruvete u osloncima i na mestu udara sa klatnom, su: koeficijent popustljivosti klatna, C_M , koeficijent popustljivosti epruvete, C_S , i koeficijent ukupne popustljivosti, C_T .

Ukupni koeficijent popustljivosti sistema klatno-epruveta predstavlja veličinu kojom se koriguje izmeren rad do maksimalne sile. Koeficijenti C_M i C_S se izražavaju kao odnos utrošene energije za elastičnu deformaciju prema jediničnoj sili [21].

Koeficijenti C_M , C_S i C_T povezani su sledećom zavisnošću:

$$C_T = C_M + C_S \quad 12.$$

Prema ASTM E 23 [22] za ispitivanje savijanjem u tri tačke koeficijent popustljivosti epruvete, C_S , se definiše preko svedenog koeficijenta popustljivosti epruvete, C_S^* , u obliku:

$$C_S^* = E \cdot B \cdot C_S = 72 \cdot Y + 20 \quad 13.$$

odakle sledi da je:

$$C_S = \frac{72 \cdot Y + 20}{E \cdot B} \quad 14.$$

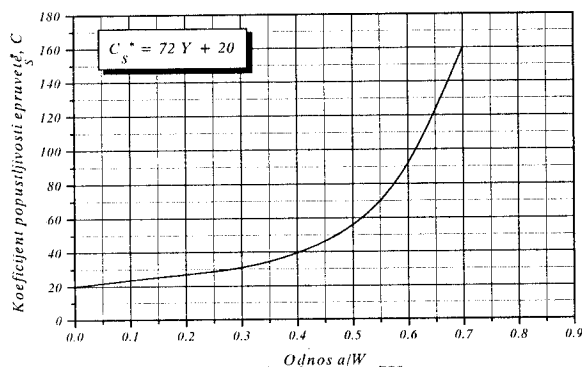
gde su:

B - debljina epruvete, m

E - modul elastičnosti materijala epruvete,

Y - funkcija geometrije epruvete, odnosno dužine prsline i visine epruvete.

Zavisnost svedenog koeficijenta popustljivosti epruvete, C_S^* , od odnosa a/w je data u vidu dijagrama na sl. 6.



Slika 6. Zavisnost C_s^* od odnosa a/W

Koeficijent ukupne popustljivosti sistema mašina - epruveta, C_T , izračunava se iz odnosa:

$$C_T \cong \frac{v_p \cdot t_{GY}}{P_{GY}} \quad 15.$$

gde su:

v_p - početna brzina klatna, m/s;
 t_{GY} - vreme koje odgovara sili P_{GY} , s.

3.1. Metoda dinamičkog J integrala

Kritična vrednost dinamičkog J integrala, J_{ld} , data je u obliku [63]:

$$J_{ld} = \frac{2 \cdot \overline{\Delta E_M}}{b \cdot d} \quad 17.$$

gde su:

$\overline{\Delta E_M}$ - energija utrošena za deformaciju do maksimalne sile na oscilogramu sila - vreme, korigovana koeficijentom popustljivosti klatna,
 $b = w - a$ - dužina ligamenta poprečnog preseka ispred zamorne prsline.

Energija $\overline{\Delta E_M}$ se može izračunati pomoću zavisnosti:

$$\overline{\Delta E_M} = \Delta E_M - \frac{P_M^2 \cdot C_M}{2} \quad 18.$$

gde su:

P_M - maksimalna sila na oscilogramu sila - vreme,
 C_M - koeficijent popustljivosti klatna,
 ΔE_M - energija utrošena za deformaciju do maksimalne sile na oscilogramu sila - vreme, bez korekcije za koeficijent popustljivosti klatna.

Iz prethodnih jednačina se dobija da je:

$$J_{ld} = \frac{\Delta E_M - \frac{P_M^2 \cdot C_M}{2}}{B \cdot b} \quad 19.$$

Između J_{ld} i K_{ld} važi relacija:

a) za uslove ravnog stanja napona

$$K_{ld} = (E \cdot J_{ld})^{1/2} = \left[\frac{E}{b \cdot B} \left(E_M - \frac{P_M^2 \cdot C_M}{2} \right) \right]^{1/2} \quad 20.$$

b) za uslove ravne deformacije

$$K_{ld} = \left(\frac{E}{1 - v^2} \cdot J_{ld} \right)^{1/2} = \left[\frac{E}{b \cdot B (1 - v^2)} \left(E_M - \frac{P_M^2 \cdot C_M}{2} \right) \right]^{1/2} \quad 21.$$

3.2. Metoda ekvivalenta energije

Metoda ekvivalenta energije se zasniva na mogućnosti izračunavanja utrošene energije do maksimalne sile P_M na oscilogramu sila - vreme, sl. 5, na osnovu koje se proračunom dobija vrednost sile P^* koja odgovara lomu bez pojave plastične deformacije.

Kritični dinamički faktor intenziteta napona, K_{ld} , može da se u tom slučaju izračuna iz zavisnosti:

$$K_{ld} = \frac{P^* \cdot L}{B \cdot w^{1/2}} \cdot Y \quad 22.$$

gde su:

L - raspon oslonaca;
 Y - funkcija geometrije epruvete, odnosno dužine prsline i visine epruvete;
 B - debljina epruvete;
 w - širina epruvete;
 P^* - sila pretpostavljenog krtoq loma.
Vrednost sile P^* izračunava se iz odnosa:

$$P^* = \left(\frac{\overline{\Delta E_M}}{C_s} \right)^{1/2} \quad 23.$$

Zamenom vrednosti P^* dobijene iz zavisnosti u jedn. 22 dobija se vrednost kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona, K_{ld} .

4. EKSPERIMENTALNI DEO

Da bi se obezbedila sigurnost delova izgrađenih od klasičnih metalnih materijala kao i novih materijala, u realnim uslovima opterećenja, potrebno je razjasniti njihovo ponašanje pri delovanju udarnog opterećenja u prisustvu prsline.

Eksperimentalna ispitivanja su usmerena u pravcu proveravanja mogućnosti korišćenja metoda:

- dinamičkog J integrala, i
- ekvivalenta energije

za određivanje kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona, K_{Id} , na sobnoj temperaturi.

Izbor materijala za ispitivanje izvršen je na osnovu nivoa mehaničkih osobina i uslova eksploatacije. Imajući u vidu aktuelne svetske trendove učešća materijala u izradi savremenih konstrukcija, a pre svega mogućnost njihove primene u domaćim konstrukcijama, izabrani su reprezentativni materijali koji se relativno dosta koriste, a i koji će se u budućnosti dosta koristiti i to:

- Č 5432 (1.6604.4)
- Č 4734 (1.7734.4)

Čelici Č 5432 i Č 4734 spadaju u grupu čelika za poboljšanje. Kako nisu standardizovani po JUS-u, a na osnovu hemijskog sastava i mehaničkih svojstava u poboljšanom stanju čelik oznake 1.6604 približno odgovara čeliku Č5432, a čelik oznake 1.7734 čeliku Č4734.

Hemijski sastav ispitivanih metalnih materijala je dat u tab. 1, a mehanička svojstva su data u tab. 2.

4.1. Oblik i dimenzija epruveta i uslovi zamaranja

Sva eksperimentalna ispitivanja su rađena na sobnoj temperaturi i na standardnim Šarpi epruvetama čiji su oblik i geometrija definisani standardom ASTM

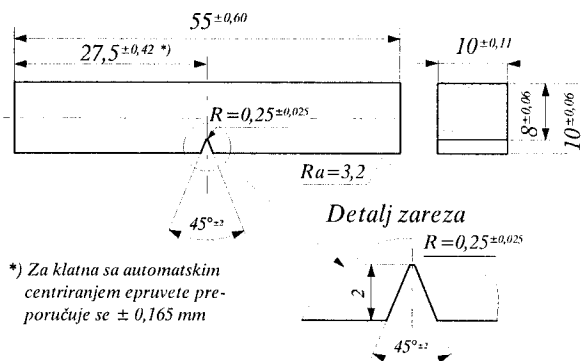
Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanih čelika

Oznaka legure	Hemijski sastav, mas. %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Č 5432 (1.6604.4)	0,31	0,18	0,45	0,018	0,021	2,15	0,41	2,02
Č 4734 (1.7743.4)	0,19	0,28	0,77	0,028	0,016	0,37	0,42	-

Tabela 2. Mehanička svojstva čelika

Oznaka legure	Napon tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje A, %	Modul elastičnosti E, GPa	Energija udara KV, J, min	Žilavost loma K_{Ic} , MPa \sqrt{m}

E23-89, sl. 7. Zbog dimenzionih ograničenja koja diktira rastojanje između oslonaca epru-vete na klatnu, a u saglasnosti sa preporukama standarda ASTM E 24.03.03. [19] pod radnim naslovom "Proposed Standard Method of Test for Instrumented Impact Testing of Pre-cracked Charpy Specimens of Metallic Materials" usvojen je alternativni odnos $B/W = 1$, što se vidi i iz izgleda epruvete.



Slika 7. Epruveta za udarna ispitivanja

Uslovi odnosno parametri za stvaranje zamorne prsline sa ciljem obezbeđenja ravnog stanja deformacije, su diktirani vrstom materijala. Prsline se iz korena mašinskog zarezra stvara jednosmerno promenljivim opterećenjem, sl. 8. Uslovi zamaranja su definisani i dati u tab. 3.

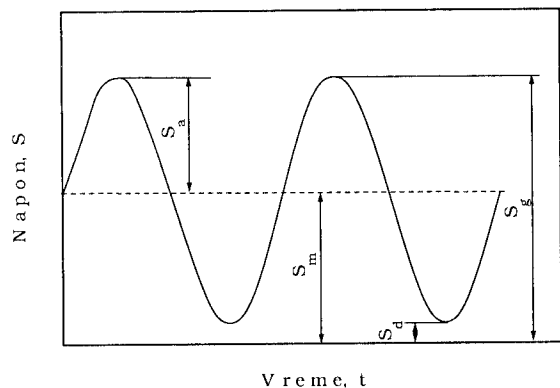
Pod početnim uslovima zamaranja podrazumevaju se uslovi koji nakon N_p ciklusa izazivaju pojavu zamorne prsline.

Pod krajnjim uslovima zamaranja podrazumevaju se uslovi koji obezbeđuju kontrolisani odnosno stabilni rast prsline do propisane dužine, za N_K broj ciklusa [24].

Č 5432 (1.6604.4)	780	1250	10	210	35	145
Č 4734 (1.7743.4)	885	1300	10	210	40	175

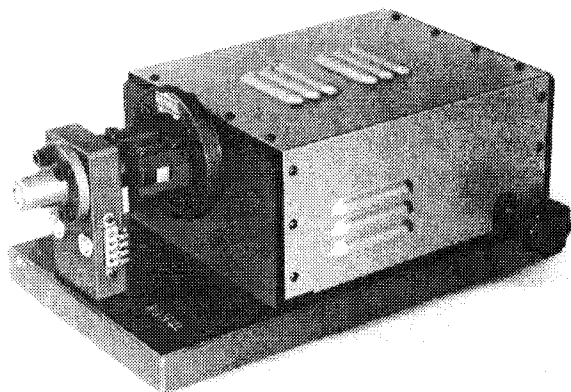
Tabela 4. Uslovi zamaranja epruveta za stvaranje zamorne prsline

Oznaka materijala	Odnos, $R=P_{\min}/P_{\max}$	Amplituda sile, S , Ncm	Broj ciklusa, N
Č 5432 (1.6604.4)	0,1	3500	$5,8 \cdot 10^5 - 7,5 \cdot 10^5$
Č 4734 (1.7743.4)	0,1	4250	$4,4 \cdot 10^5 - 6,1 \cdot 10^5$



Slika 8. Uslovi stvaranja zamorne prsline

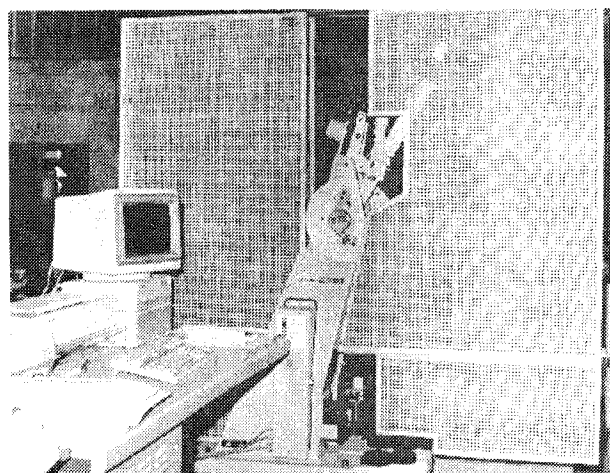
Sam postupak zamaranja je izveden na visokofrekventnom pulzatoru CRACKTRONIC sl. 9.



Slika 9. Visokofrekventni pulzator CRACKTRONIC

Ovaj pulzator ostvaruje sinusoidalno jednosmerno promenljivo momentno opterećenje u opsegu od -70 do 70 Nm. Sva zamorna ispitivanja su obavljena pri istom odnosu minimalnog i maksimalnog opterećenja $R=0,1$. Srednje opterećenje i amplituda opterećenja je registrovana sa tačnošću ± 5 Ncm. Učestanost se kretala od 175-255 Hz, u zavisnosti od vrste materijala, stanja termičke obrade uzorka i veličine opterećenja [25].

Ispitivanje epruveta u cilju određivanja ukupne energije udara, E_{uk} , energije stvaranje prsline, E_{inic} , energije širenja prsline, E_{lon} , kao i ostalih elemenata neophodnih za proračun kritičnog dinamičkog faktora intenziteta napona, K_{ld} , su rađeni na instrumentiranom Šarpi klatnu sa osciloskopom SCHENCK TREBEL sa opsegom udarnog opterećenja 150/300 J (sl. 10).



Slika 10. Instrumentirano Šarpi klatno sa osciloskopom

4.2. Rezultati ispitivanja

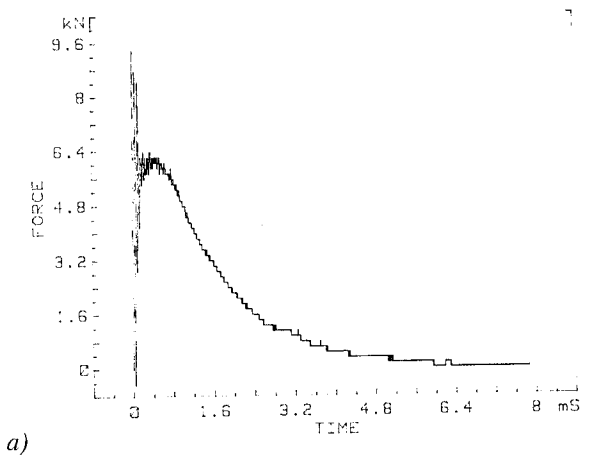
Koristeći metode dinamičkog J integrala i ekvivalenta energije i snimanjem oscilograma sila F - vreme τ i energija E - vreme τ pri udarnom savijanju epruveta izrađenih od čelika, dobijeni su parametri neophodni za proračun kritičnog dinamičkog intenziteta napona, K_{ld} , ili popularnije nazvano, dina-mičke žilavosti loma.

Rezultati određivanja K_{ld} su dati za:

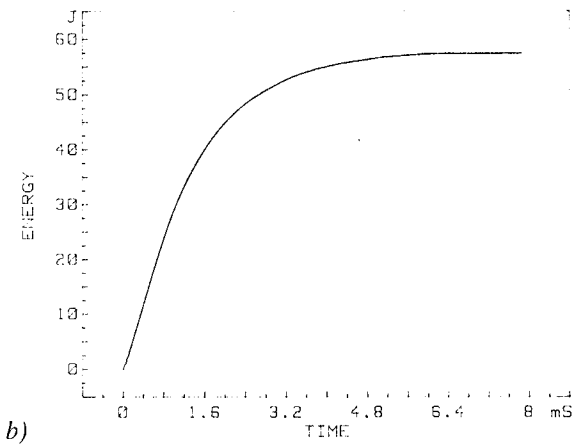
- čelik Č 5432 (1.6604.4) - tab. 4,
- čelik Č 4734 (1.7734.4) - tab. 5.

Tipičan izgled dijagrama sila P - vreme τ i energija E - vreme τ dobijenih pri udarnom savijanju epruveta dati su na sl. 11 za čelik Č 5432 (1.6604.4)

i na sl. 12. za čelik Č 4734 (1.7734.4). Zbog obimnosti dijagrama dobijenih ispitivanjem velikog broja epruveta ostali dijagrami nisu prikazani.



a)



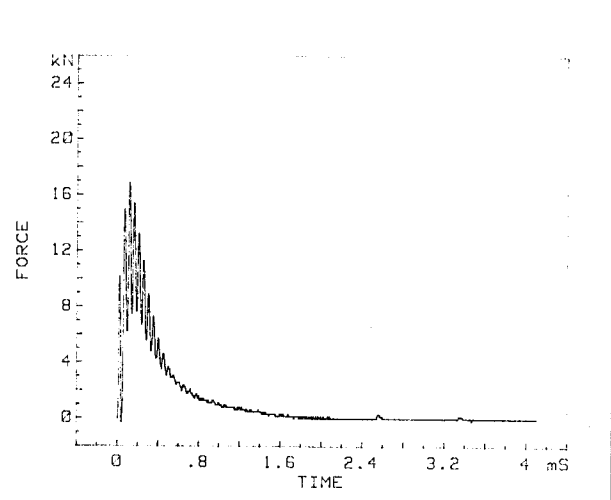
b)

Slika 11. Oscilogram dobijen udarnim savijanjem epruveta izrađenih od čelika Č 5432 na klatnu: a) sila F - vreme τ , b) energija E - vreme τ

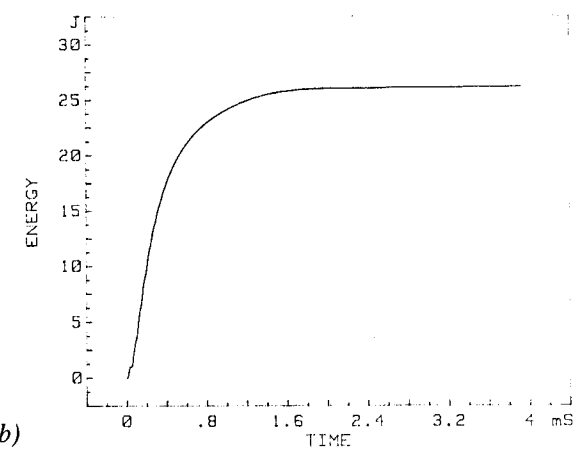
5. ZAKLJUČAK

Rad predstavlja doprinos u ovladavanju metodama koje definišu ponašanje materijala u dinamičkim uslovima rasta prsline. Primena ovih metoda zajedno sa ostalim metodama za određivanje parametara mehanike loma treba da predstavlja značajan doprinos istraživanju ponašanja konstrukcijskih materijala u prisustvu prsline. U radu su razrađene dve metode za određivanje kritičnog dinamičkog

faktora, K_{ld} , i to: metoda dinamičkog J integrala, i metoda ekvivalenta energije.



a)



b)

Slika 12. Oscilogram dobijen udarnim savijanjem epruveta izrađenih od čelika Č 4734 na klatnu: a) sila F - vreme τ , b) energija E - vreme τ

Eksperimentalni rad je obuhvatao osvajanje ovih metoda na čelicima Č 5432 i Č 4734 kao konstrukcijskim materijalima. Upoređivanjem rezultata u tab. 4 i 5 može se zaključiti da je rasipanje rezultata između 10 i 15% što je u dozvoljenim granicama i smatra se zadovoljavajućom tačnošću.

Tabela 4. Rezultati određivanja K_{Id} čelika I.6604.4 po metodi dinamičkog J integrala i ekvivalenta energije

Oznaka uzorka	Odnos a/W	f(a/W)	P_{max} N	Vreme τ , $\times 10^{-5}$, s	C_T m/N	C_M m/N	C_S m/N	ΔE_M J	ΔE_M J	J_{Id} N/m	K_{Id} MPa \sqrt{m}	F* N	Odnos a/W	K_{Id}^* MPa \sqrt{m}
A1	0.456	0.395	15250	14.0	5.36E-08	3.05E-08	2.31E-08	7.05	3.50007	64339.6	116.24	12315.2	2.325	114.55
A2	0.467	0.424	14820	14.0	5.15E-08	2.74E-08	2.41E-08	6.80	3.78733	71056.8	122.16	12548.8	2.404	120.65
A3	0.477	0.451	14810	14.0	5.15E-08	2.65E-08	2.50E-08	6.95	4.04140	77273.4	127.39	12715.1	2.478	126.06
A4	0.486	0.478	14600	13.5	5.04E-08	2.45E-08	2.59E-08	6.35	3.73991	72760.8	123.61	12015.6	2.549	122.51
A5	0.489	0.487	14510	13.5	5.07E-08	2.45E-08	2.62E-08	6.65	4.07220	79690.8	129.36	12462.6	2.573	128.27
A6	0.495	0.506	14410	13.5	5.11E-08	2.42E-08	2.69E-08	6.85	4.33842	85909.4	134.32	12707.3	2.623	133.30
A7	0.503	0.532	14270	13.5	5.16E-08	2.38E-08	2.78E-08	6.15	3.72835	75017.1	125.51	11586.0	2.691	124.70
A8	0.515	0.575	14160	14.0	5.39E-08	2.47E-08	2.92E-08	6.10	3.62866	74817.8	125.35	11141.3	2.798	124.71
A9	0.522	0.601	14010	13.5	5.25E-08	2.24E-08	3.01E-08	6.25	4.05424	84816.8	133.46	11597.6	2.864	132.87
A10	0.531	0.637	13950	13.0	5.08E-08	1.94E-08	3.14E-08	5.25	3.36153	71674.4	122.69	10350.0	2.952	122.22

Tabela 5. Rezultati određivanja K_{Id} čelika I.7734.4 po metodi dinamičkog J integrala i ekvivalenta energije

Oznaka uzorka	Odnos a/W	f(a/W)	P_{max} N	Vreme τ , $\times 10^{-5}$, s	C_T m/N	C_M m/N	C_S m/N	ΔE_M J	ΔE_M J	J_{Id} N/m	K_{Id} MPa \sqrt{m}	F* N	Odnos a/W	K_{Id}^* MPa \sqrt{m}
B1	0.452	0.385	14550	13.1	4.91E-08	2.63E-08	2.27E-08	6.35	3.56313	65020.5	116.85	12517.4	2.298	115.05
B2	0.462	0.411	14520	13.2	4.95E-08	2.59E-08	2.36E-08	6.45	3.71495	69051.1	120.42	12546.5	2.368	118.82
B3	0.471	0.435	14490	12.8	4.81E-08	2.37E-08	2.44E-08	6.30	3.80971	72017.2	122.98	12489.8	2.433	121.56
B4	0.477	0.451	14470	12.9	4.86E-08	2.36E-08	2.50E-08	6.25	3.78042	72283.3	123.21	12297.7	2.478	121.92
B5	0.485	0.475	14410	12.3	4.65E-08	2.07E-08	2.58E-08	6.15	3.99888	77648.1	127.70	12449.5	2.541	126.54
B6	0.493	0.499	14350	12.1	4.60E-08	1.93E-08	2.66E-08	6.05	4.06220	80122.4	129.71	12346.5	2.606	128.70
B7	0.507	0.546	14310	11.7	4.46E-08	1.63E-08	2.82E-08	5.85	4.17981	84783.2	133.43	12164.4	2.726	132.64
B8	0.513	0.568	14200	11.5	4.41E-08	1.52E-08	2.90E-08	5.65	4.12199	84640.5	133.32	11926.0	2.780	132.62
B9	0.527	0.621	14050	12.2	4.73E-08	1.65E-08	3.08E-08	5.85	4.22106	89240.1	136.90	11702.9	2.913	136.34
B10	0.536	0.659	13910	11.5	4.51E-08	1.30E-08	3.21E-08	5.15	3.89674	83981.5	132.80	11017.3	3.003	132.34

Legenda:

- P_{max} - Maksimalna sila na oscilogramu sila F- vreme τ
- C_T - Ukupni koeficijent popustljivosti
- C_M - Koeficijent popustljivosti epruvete
- C_S - Koeficijent popustljivosti klatna
- ΔE_M - Energija stvaranja prsline
- ΔE_M - Korigovana energija stvaranja prsline
- J_{Id} - Dinamički J integral
- K_{Id} - Krit. dinamički faktor intenzit. napona po met. dinam. J integrala
- F* - Sila pretpostavljenog krto g loma
- K_{Id}^* - Krit. dinamički faktor intenzit. napona po met. ekvivalenta energije

6. LITERATURA

1. M. Burzić, "Eksperimentalna istraživanja u oblasti određivanja dinamičkih parametara mehanike loma kod livenog Al-SiC_p metal matričnog kompozita", Mag. rad, TMF, 2001.
2. Z. Burzić, M. Burzić, J. Čurović, M. Zrilić, "Primena novih metoda određivanja parametara rasta zamorne prsline kod zavarenih spojeva", IBR 2002, Tara, 25-29 novembar 2002
3. G. Charpy, "Note sur l'essai des metaux a la flexion par choc de barreaux entaillés", Association internationale pour l'essai des materiaux - Budapest, 1901.
4. A. P. Green, B. B. Hundy, "Initial Plastic Yielding in Notch Bend Tests", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, p. 128, 1956.
5. J. C. Radon, C. E. Turner, "Fracture Toughness Measurements by Instrumented Impact Test", Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, No. 3, p. 411-428, 1969.
6. H. W. Viehring, K. Popp, R. Rintamaa, "Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters Using Various Methods", 10th Congress on Material Testing, Budapest, p. 201-210, 1991.
7. D. Drenić, "Analiza razvoja prsline pri dejstvu udarnog opterećenja u čeliku visoke čvrstoće", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, 1982.
8. V. Kudrin, "Steelmaking", Mir Publishers, p. 11-12, 1989.
9. J. F. Kalthof, "Concept of Impact Response Curves", ASM Handbook, Vol. 8, p. 269, 1995.
10. E. M. Basko, Zavodskaja laboratorija, 6/542, 1989.
11. W. L. Server, A. S. Tetelman, "The Use of Pre-cracked Charpy Specimens to Determine Dynamic Fracture Toughness", Eng. Frac. Mechanics, p. 367, 1972.
12. T. Kobayashi, I. Yamamoto, M. Ninomi, "Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test", Eng. Frac. Mechanics, Vol. 24, p. 733-782, 1986.
13. H. J. Mac Gillivray, V. Grabulov, "Razvoj postupka merenja pada potencijala jednosmerne struje za ispitivanje J-R krive na epruvetama [arpi]", Zbornik, Međunarodno savetovanje Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Beograd, 1987.
14. W. Bohme, Scientific Report W 3/89, Fraunhofer-Institut, Freiburg, 1989.
15. W. Bohme, "Rapid load Fracture Testing", ASTM STP 1130, 1992, p. 92-103.
16. E. C. J. Buys, "Instrumentation of the Sharp V Notch Impact Test", Rep. M. 67-IR (23) 507005, Metall Inst. TNO, 1977.
17. P. McConnell, W. L. Server, "Epru Instrumented Impact Test Procedures", CSNI Specialists Meeting on Instrumented Precracked Charpy Testing, Palo Alto, California, 1985.
18. R. M. Curr, H. J. Mac Gillivray, C. E. Turner, "A Comparasion 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.
19. ASTM 24.03.03., "Proposed Standard Method of Test for Instrumented Impact Testing of Precracked Charpy Specimens of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, 1993.
20. H. J. Mac Gillivray, C. E. Turner, "A Comparison of Dynamic R-Curve Methods" Fourth International Conference on the Mechanical at high Rates of Strain, Oxford, March 1989.
21. A. V. Prokopenko, "Problemi pročnosti", 7/47, 1978.
22. ASTM E23-82, "Standard Method for Notched Bar Impact Testing of Metalic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, p. 229, 1989.
23. H. J. Schindler, "Approximative Bestimmung Dynamischer Jc - Werte und J-R Kurven mit Schlagbiegeversuchen", EMPA, Dubendorf, 1995.
24. M. Burzić, Z. Burzić, D. Jaković, D. Momčilović, "Utical sadržaja ojačavača na vrednosti energije udara livenog Al-SiC_p metal matričnog kompozita", Naučno- tehnički pregled, 1998, Vol. 48, No. 4, Str. 208-212.
25. G. B. Lenki, "Instrumentirano udarno ispitivanje i njegova primena na mehaniku loma", Letnja škola mehanike loma, Velika Plana, p. 39-48, 1997.