

Analiza širenja pukotine u strojarskim konstrukcijama

Budimir MIJOVIĆ⁽¹⁾, Ismet PAŠALIĆ⁽²⁾ i Ante AGIĆ⁽³⁾

1) Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, (Faculty of Textile Technology, University of Zagreb), Baruna Filipovića 30, HR - 10000 Zagreb, **Republic of Croatia**

2) Privredna komora USK, (Chamber of economy of USK) 501. slavne brigade b.b., 37000 Bihać, **Bosnia and Herzegovina**

3) Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu (Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb), Marulićev trg 20, HR - 10000 Zagreb, **Republic of Croatia**

budimir.mijovic@ttf.hr

Ključne riječi

Cikličko opterećenje

Duktilnost

Koeficijent intezivnosti naprezanja

Mehanika loma

Keywords

Cyclic loading

Ductility

Fracture mechanics

Stress intensity factor

Received (primljeno): 2008-03-15

Accepted (prihvaćeno): 2008-12-19

Prethodno priopćenje

U radu je izvršena eksperimentalna analiza širenja pukotine kod čelika DIN 42CrMo4V. Ovaj materijal u poboljšanom stanju ima visoku čvrstoću i žilavost. Koristi se za statički i dinamički opterećene konstrukcijske dijelove, posebno za veće presjeka s visokim opterećenjem. Cilj rada je pronaći mogućnost što točnijeg i preciznijeg eksperimentalnog određivanja karakteristika pukotine kod trodimenzijskih problema mehanike loma. Izrađene su epruvete sa zarezom s iniciranom greškom tipa pukotine u cilju određivanja udarnih svojstava i parametara mehanike loma. Ova ispitivanja omogućuju uspostavljanje ovisnosti geometrije pokretne pukotine i uvjeta naprezanja za njeno daljnje širenje. Time je moguće odrediti iznose parametara koji opisuju ponašanje materijala, kako u linearno-elastičnoj tako i u elasto-plastičnoj mehanici loma.

Analysis of Crack Extension in Mechanical Constructions

Preliminary note

The paper investigates an experimental analysis of crack extension in steel DIN 42CrMo4V. This improved material has a high strength and toughness. It is used for statically and dynamically stressed components, in particular for larger cross-sections under high stress. The aim of the paper is to find possibility for more accurate and precise experimental determination of crack characteristics in three-dimensional problems of fracture mechanics. Notched test specimens with an initiated defect as a crack were made to determine impact properties and parameters of fracture mechanics. These investigations allow establishing the dependence of geometry of the movable crack and conditions of stress for its further extension. Therefore, it is possible to determine the characteristic quantity describing material behaviour, both in linearly elastic and in elasto-plastic fracture mechanics.

1. Uvod

Lom zbog cikličnog opterećenja najučestaliji je oblik loma u praksi. Takvi se lomovi mogu dogoditi i kod vrijednosti naprezanja koje su manje od granice tečenja i kod duktilnih materijala niske čvrstoće [1, 2, 3]. Veliki broj lomova konstrukcija, do kojih dolazi tijekom eksploatacije pri nivou naprezanja nižem od dopuštenog, ukazuje na opasnost od pojave krhkog loma [4, 5]. Zbog toga je pri projektiranju konstrukcija neophodno definirati kriterije na temelju kojih se može postići sigurnost konstrukcije od krhkog loma. Za ocjenu ponašanja visokočvrstih čelika u dinamičkim uvjetima, pored utjecaja promjenjivog opterećenja na iniciranje pukotine

pri koncentraciji naprezanja tipa V-zreza, mjerodavni su i parametri mehanike loma koji pretpostavljaju prisutnost greške tipa pukotine, a to je, prije svega, brzina rasta zamorne pukotine, da/dN , i prag zamora ΔK_{th} [6, 7, 8]. Mehanička svojstva materijala su od velike važnosti za određivanje posljedica krhkog loma u strojarskim konstrukcijama. Kako se čelik DIN 42CrMo4V koristi za izradu pouzdanih konstrukcija, važno je analizirati utjecaj greške tipa pukotine na njegovo ponašanje pri djelovanju dinamičkog opterećenja [9, 10, 11]. Razvoj u proučavanju ponašanja materijala pri djelovanju promjenjivog opterećenja, omogućen je paralelnim uvođenjem eksperimentalnog i teorijskog pristupa.

Oznake/Symbols

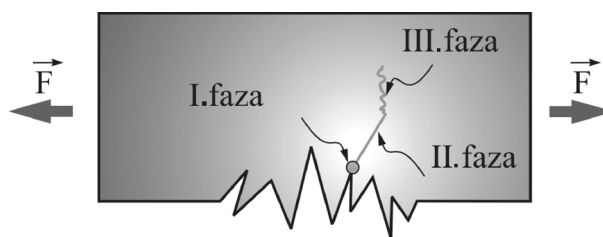
K	- koeficijent intenzivnosti naprežanja - stress-intensity factor	ΔK_{th}	- prag zamora - fatigue threshold
σ_N	- nominalno naprežanje - nominal stress	da/dN	- brzina rasta pukotine - crack propagation
a_c	- kritična duljina pukotine - critical crack length	Cr, Mo	- krom, molibden - crom, molybden
$K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}$	- kritične vrijednosti koeficijena intenzivnosti naprežanja - critical values of stress intensity factors	DIN 42CrMo4V	- oznaka čelika odabranog za eksperiment - steel type chosen for experiment
W	- širina ploče - plate width	a	- duljina pukotine - crack length
δ	- debljina ploče - plate thickness	K_I	- stvarni koeficijent intenzivnosti naprežanja - real stress intensity factor
σ_{max}	- maksimalno naprežanje - stress maximum	B	- širina epruvete - specimen width
ρ	- polumjer zaobljenja - radius of curvature	σ_D	- dinamička čvrstoća - dynamic strength
ΔK	- dinamički koeficijent intenzivnosti naprežanja - dynamic stress intensity factor	σ_m	- srednje naprežanje - mean stress
$\Delta\sigma$	- područje promjene naprežanja - stress variability range	σ_a	- amplituda naprežanja - stress amplitude
R	- faktor asimetrije ciklusa - cycle asymmetry factor	Ξ	- osjetljivost pukotine - crack sensitivity
		E_T	- energija udara - impact energy

2. Teorijski dio

Kod analize napregnutog stanja u blizini pukotine najčešće se polazi od pretpostavke linearne teorije elastičnosti, gdje se uključuje i efekt plastifikacije pri vršku pukotine [12, 13, 14]. Ovaj pristup pretpostavlja da promatrani element ili tijelo ima samo jednu pukotinu s jednom plastičnom zonom pri vršku pukotine. Uzima se uvijek da krhki lom nastaje kao posljedica velike brzine opterećenja, tako da je otežana plastična deformacija [15, 16]. Pri proračunu čvrstoće konstrukcije potrebno je voditi računa o unutarnjim sitnim šupljinama, pukotinama koje su prisutne u svakom realnom materijalu, proizvedenom uobičajenim tehnološkim postupcima. Kada se radi o duktilnom materijalu u zoni oštrog naprežanja uslijed vanjskog opterećenja, doći će do plastičnog tečenja [17]. Kod ciklički opterećenih elemenata pukotine se počinju formirati na slobodnoj površini, slika 1.

Razlikuju se dvije faze stabilnog širenja pukotine. U prvoj fazi neposredno nakon nukleacije dolazi do širenja u smjeru primarnih površina klizanja. Promjena smjera širenja pukotine nastaje kad duljina pukotine dovoljno

naraste da prevlada kidanje okomito na smjer glavnog vlačnog naprežanja, što ujedno predstavlja završetak prve, a početak druge faze. Druga faza stabilnog širenja može se vizualno utvrditi po karakterističnom izgledu površine loma. Izgled površine može se dovesti u vezu s načinima širenja pukotine po presjeku [18].



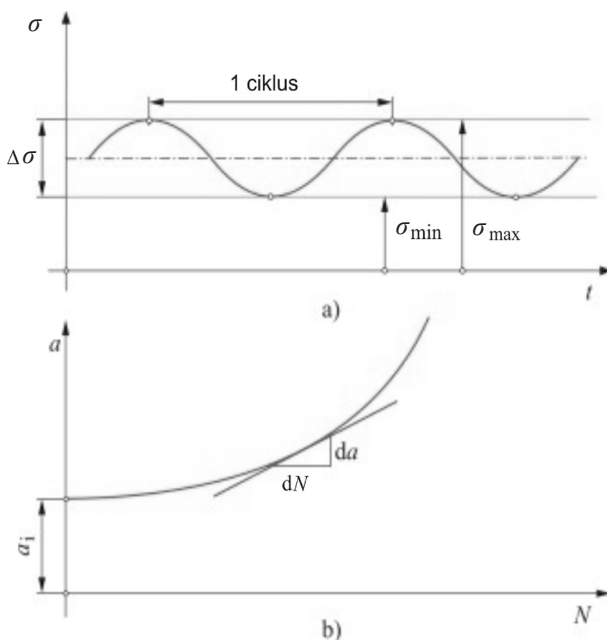
Slika 1. Pojava pukotine kod vlaka i tlaka

Figure 1. Occurrence of a crack in tension and compression

Kod materijala sklonih krhkom lomu, početak nestabilnog širenja pukotine nastupit će onda kada duljina pukotine dosegne kritičnu vrijednost $2a_c$ pri nazivnom naprežanju σ_N . Kod izrazito duktilnih materijala, druga faza stabilnog širenja pukotine će se

protegnuti sve dok ostatak presjeka objekta, koji na sebe preuzima cjelokupno opterećenje, ne bude više u stanju nositi vanjsko opterećenje. Poznavanje parametara koji određuju brzinu širenja pukotine u predkritičnoj fazi od velike je važnosti za procjenu vijeka trajanja ciklički opterećenog objekta, odnosno za utvrđivanje intervala kontrolnih pregleda.

Mnogobrojnim pokusima utvrđeno je da i brzina širenja ciklički opterećene pukotine ovisi o koeficijentu intenzivnosti naprezanja, koji se, međutim, razlikuju od statičkog K_I , K_{II} , K_{III} . Snimanjem krivulje $a = a(N)$, dobiva se mogućnost da se iz tangente na tu krivulju zaključi o brzini širenja pukotine da/dN , tj. na prirast duljine pukotine po jednom ciklusu opterećenja, slika 2.



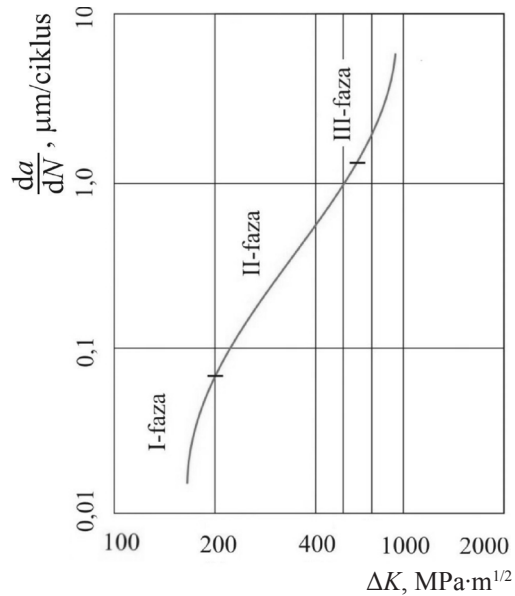
Slika 2. Karakteristika cikličkog opterećenja: a) cikličko opterećenje; b) veza između duljine pukotine a i broja ciklusa N

Figure 2. Characteristic of cyclic loading: a) cyclic stress (loading); b) correlation between crack length a and number of cycles N

Poznaje li se područje naizmjeničnog naprezanja $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, može se na temelju duljine pukotine a u promatranom trenutku kada nastupa širenje pukotine za da izračunati područje promjene koeficijenta intenzivnosti naprezanja ΔK , kojem se pripisuje to proširenje, prema osnovnoj jednadžbi:

$$\Delta K = Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a}, \tag{1}$$

gdje je Y - kalibracijska funkcija. Izračunati ΔK i eksperimentalno određena brzina da/dN omogućuju konstrukciju krivulje $da/dN = f(\Delta K)$, kako je to prikazano na slici 3.



Slika 3. Ovisnost brzine širenja pukotine da/dN o promjeni koeficijenta intenzivnosti naprezanja ΔK

Figure 3. Dependence of crack extension on stress intensity factor range, ΔK

Razlikujemo tri faze širenja pukotine (slika 3). Kod mnogih materijala druga faza širenja pukotine (faza stabilne pukotine) može se u log-log dijagramu dovoljno dobro aproksimirati pravcem. Ta se ovisnost može uspješno opisati npr. Parisovom jednadžbom:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \tag{2}$$

Faktori Parisove jednadžbe C i m određuju se iz linearnog dijela krivulje na slici 3. Kod proračuna ciklički opterećenih komponenti za područja II i III Forman [19, 20] predlaže jednadžbu oblika:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{K_C (1-R) - \Delta K}, \tag{3}$$

gdje je $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ faktor asimetrije opterećenja. Najčešća vrijednost eksponenta m je 3,7. Za veće područje raznovrsnih čelika s granicom tečenja između 200 i 1400 MPa, eksponent m uzima se između 2 i 4. Da bi se procijenilo koliko nekom elementu preostaje energije do potpunog loma, treba poznavati veličinu K na početku procesa širenja pukotine (tj. i – inicijalni). Kada je $K_{Ic} - K_{II} > 0$, odnosno $\frac{K_{II}}{K_{Ic}} < 1$, pukotina raste sporo. Taj

spori rast proteže se od inicijalne pukotine a_i do kritične duljine pukotine a_c . Kako je K_{Ic} ovisan o nazivnom opterećenju σ_N i veličini inicijalne pukotine a_i , može se za zadano naprezanje i zadani vijek trajanja izračunati numeričkom integracijom Formanove relacije kolika je

dopuštena inicijalna pukotina ili za zadanu (otkrivenu) inicijalnu pukotinu i zadano opterećenje može se prognozirati vijek trajanja strojnog elementa.

3. Eksperimentalni dio

Prilikom eksperimentalne analize ponašanja materijala nastoji se uključiti i one realne faktore koji proizlaze iz nekontinuiranosti i nehomogenosti materijala. Tako se uzimaju u obzir i male pukotine u materijalu kod ocjene stvarne čvrstoće konstrukcije ili pojedinog strojnog elementa. Broj ciklusa opterećenja za ispitivane uzorke mora biti između 5×10^6 i 1×10^7 ciklusa, a pritom se ne smije proširiti pukotina. Za predmet istraživanja izabran je čelik DIN 42CrMo4V, koji pripada grupi visokolegiranih Cr-Mo čelika za poboljšanje. Čelik DIN 42CrMo4V koristi se za statički i dinamički opterećene konstrukcijske dijelove, posebno za veće presjeka s visokom čvrstoćom. Iako je čelik DIN 42CrMo4V jedan od najviše korištenih čelika za izradu osovine, vratila itd., njegovo ponašanje u prisutnosti greške tipa pukotine još nije dovoljno istraženo, naročito kada se radi o velikim presjecima (preko 300 mm). Ispitivanje u cilju određivanja brzine rasta zamorne pukotine da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na standardnim Charpy epruvetama metodom savijanja epruvete u trima točkama na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru cracktronic, slika 4.

Na mehanički pripremljene epruvete zalijepljene su mjerne trake rumel rnf a-5 mjerne duljine 5 mm, pomoću kojih je praćen rast pukotine, slika 4.a, uređajem za fractomat, temeljen na promjeni električnog potencijala

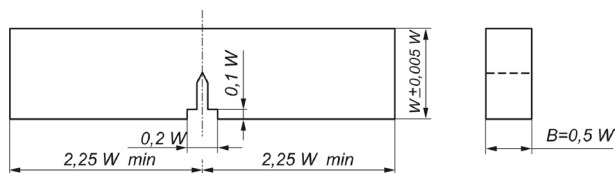


1. Davač impulsa / Pulse generator
2. Mjerač frekvencija / Frequency measurement
3. Računalo / Computer

Slika 4. Visokofrekventni pulzator cracktronic: a) mjerne folije, b) epruveta za ispitivanje

Figure 4. High-frequency pulsator cracktronic: a) measuring foils, b) epruveta za ispitivanje,

trake. Traka je tanka otporna mjerna folija zalijepljena na epruvetu na isti način kao i klasične mjerne trake za mjerenje deformacije. Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje prikazan je na slici 5. Problematika dinamike mjerenja opisana je detaljnije u radu [21].

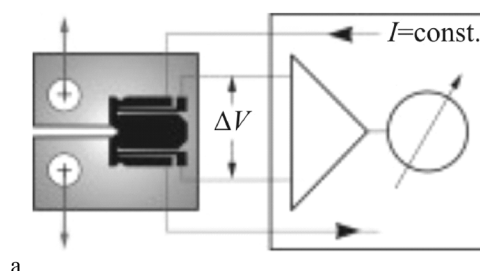


Slika 5. SENB epruveta

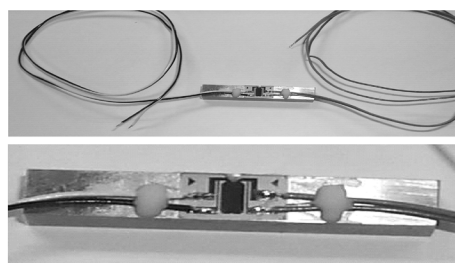
Figure 5. SENB specimen

Kako zamorna pukotina raste ispod mjerne folije, ona se cijepa prateći vrh zamorne pukotine, čime se električni otpor folije mijenja s promjenom duljine pukotine. Broj ciklusa se automatski registrira za svako povećanje inkrementa pukotine $\Delta a = 0,05$ mm. Ima nekoliko metoda kalibracije mjerne krivulje napon-porast pukotine [22]. Uglavnom se mogu podijeliti na eksperimentalne i numeričke. Eksperimentalna kalibracija provodi se tako da se nekom drugom metodom mjeri veličinu pukotine uz istovremeno mjerenje pada potencijala. To je najčešće mjerenje pukotine optičkim metodama na površini za vrijeme testa. Numerička kalibracija se temelji na rješenju Laplaceove jednačbe za zadanu geometriju i rubne uvjete [23].

$$\nabla^2 V = 0, \quad (4)$$

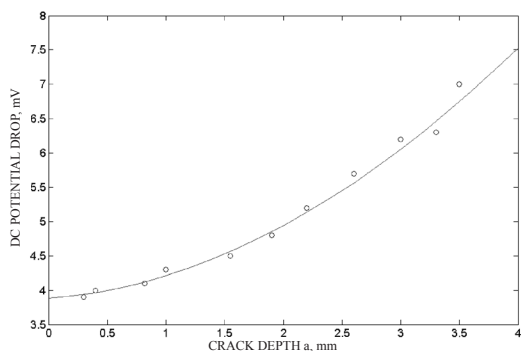


a



b

gdje je V električki potencijal. Na slici 6 prikazana je kalibracijska krivulja ovisnosti promjene napona o veličini pukotine za materijal 42CrMo4V.



Slika 6. DCPD kalibracijska krivulja za materijal DIN 42CrMo4V

Figure 6. Direct current potential drop (DCPD) calibration curve for material DIN 42CrMo4V

Dva su bitna ograničenja u standardu ASTM E647: brzina rasta treba biti veća od 10^{-8} m/ciklus da bi se izbjeglo područje praga zamora, ΔK_{th} , a opterećenje treba biti konstantne amplitude [24]. U našem slučaju $R = 0,1$. Analiza zamornog loma može se podijeliti u dvije faze i to: na period stvaranja (iniciranja) u kojem zamorna pukotina nastaje, te period u kojem se nastala pukotina širi do kritične veličine pri kojoj dolazi do nestabilnog loma. Time se ukupan broj ciklusa, N_u , kod kojega dolazi do loma, dijeli na broj ciklusa potrebnih da zamorna pukotina nastane, N_i , i broj ciklusa da ona poraste do kritične veličine, N_p .

$$N_u = N_i + N_p \quad (5)$$

Iako Parisova jednadžba rasta pukotine ne vrijedi u čitavom području između malih brzina u blizini praga zamora ΔK_{th} na slici 3. i velikih brzina K_{Ic} , linearni srednji dio krivulje pokriven Parisovim izrazom s praktične točke gledišta pokazao se važnim zato što istovremeno dopušta da se napravi razlika između inicijalnosti i rasta zamorne pukotine.

Određivanje ovisnosti brzine rasta zamorne pukotine po ciklusu da/dN i područja promjena koeficijenta intenzivnosti naprezanja ΔK svodi se na određivanje faktora C i eksponenta m u Parisovoj jednadžbi. Brzini rasta zamorne pukotine treba za trenutnu duljinu pukotine a , pridružiti područje promjene koeficijenta intenzivnosti naprezanja, ΔK , koji ovisi od geometrije epruvete, duljine pukotine i od područja promjene sile, $\Delta F = F_g - F_d$ (F_g - maksimalni iznos opterećenja, dok je F_d - minimalni iznos opterećenja). Za određivanje područja promjene koeficijenta intenzivnosti naprezanja koristi se jednadžba [20]:

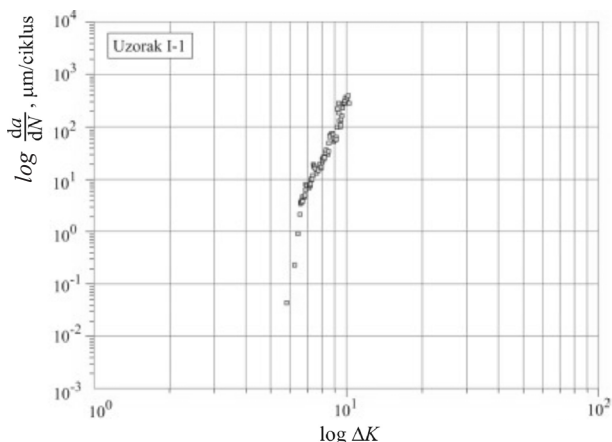
$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \sqrt{W^3}} f(a/W), \quad (6)$$

gde je:

$$f(a/W) = \frac{3 \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]. \quad (7)$$

4. Rezultati

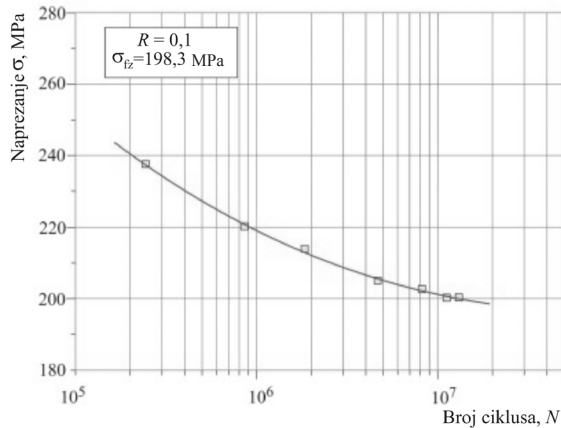
Na osnovu tijeka ispitivanja izračunate su i nacrtane ovisnosti $\log da/dN - \log \Delta K$. Da bi se odredili nepoznati parametri u Parisovoj i Formanovoj jednadžbi, one su prikazane kao linearne u log-log skali kako bi se mogla koristiti linearna regresija. Koristeći podatke za ΔK i da/dN sistem linearnih jednadžbi formiran je i riješen Gaussovom metodom eliminacije. Cijela se procedura bazira na minimizaciji zbroja kvadrata pogreške brzine rasta pukotine da/dN . Kao rezultat su faktori u Parisovoj jednadžbi (2) $C = 8,64 \times 10^{-10}$ i $m = 3,224$ [20]. Na slici 7 prikazan je dijagram ovisnosti da/dN od ΔK .



Slika 7. Dijagram ovisnosti $da/dN - \Delta K$

Figure 7. Dependence diagram of $da/dN - \Delta K$

Dinamička čvrstoća u ovome je radu određena kao naprezanje σ pri usvojenom broju promjena opterećenja, $N = 10^7$. Dinamička čvrstoća σ_D definirana je kao zbroj srednjeg naprezanja σ_m i amplitude naprezanja σ_a . Rezultati ispitivanja na zamor epruveta sa zarezom dani su u obliku $\sigma - N$ krivulje na slici 8.

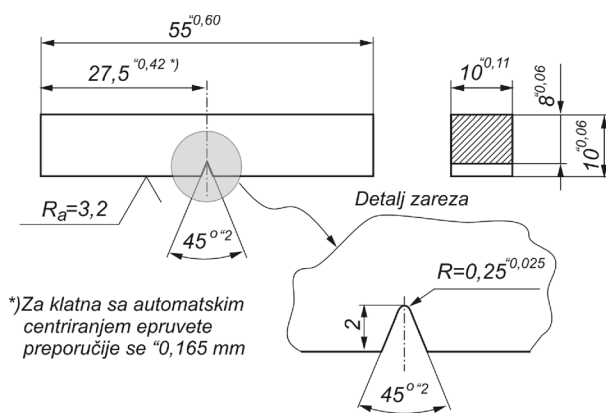


Slika 8. $\sigma - N$ dijagram epruveta sa zarezom
Figure 8. $\sigma - N$ curve of notched specimens

Osjetljivost na pukotine Ξ ispitivanog materijala je određena omjerom vrijednosti ukupne energije udara (E_T veličine) dobivene na standardnoj ISO-V epruveti i E_1 vrijednosti dobivenoj na ISO-V epruveti na kojoj je izvedena zamorna pukotina:

$$\Xi = \frac{E_T}{E_1} \quad (8)$$

Za određivanje osjetljivosti na pukotine Ξ korištene su epruvete čijim ispitivanjem je dobivena Wöhler-ova krivulja epruveta sa zarezom. Duljina zamorne pukotine kretala se od 1 do 5 mm, mjereći od korijena zareza na ISO-V epruveti (slika 9).



Slika 9. ISO-V epruveta
Figure 9. ISO-V specimen

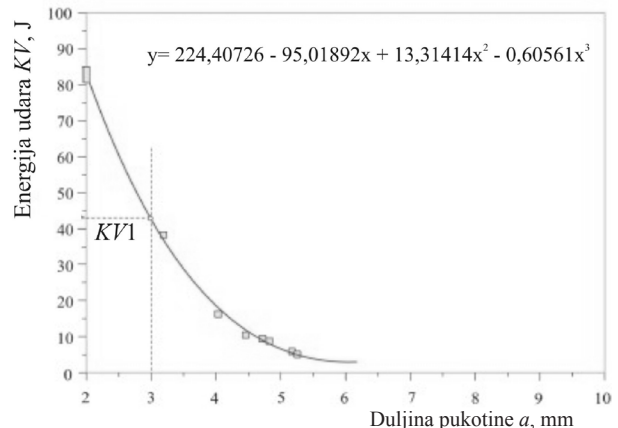
Osjetljivost na pukotinu je funkcija niza parametara

$$\Xi = \Xi(\phi, a/W, \lambda), \quad (9)$$

gdje je ϕ kut zareza, a λ eksponent koji definira singularnost polja naprezanja u vrhu zareza. Matematički osjetljivost se može iskazati jednadžbom oblika [25]

$$\Xi = \frac{\partial E_T}{\partial \{p\}}, \quad (10)$$

gdje $\{p\}^T = \{\phi, a/W, \lambda\}$ predstavlja vektor parametara. Nakon loma epruvete izmjerena je na pet mjesta duljina zamorne pukotine a , i srednja vrijednost zajedno s pripadajućom E_T -vrijednošću ukupne energije. Te veličine daju uređeni par u $E_T - a$ dijagramu. Početak dijagrama nalazi se na dubini zareza od 2 mm, standardnoj dubini zareza ISO-V epruvete, slika 10.



Slika 10. Ovisnost energije udara E_T od duljine pukotine
Figure 10. Dependence of impact energy E_T on crack length

Na slici 10. ucrtana $E_T - a$ krivulja definirana je polinomom trećeg stupnja, a dobivena je metodom najmanjih kvadrata. Dobiveni podaci o osjetljivosti prema pukotinama su od koristi za ocjenu opasnosti od grešaka tipa pukotine i njihovih značajki kod ovakvog čelika u eksploataciji.

5. Diskusija i zaključci

Nakon provjere da materijal konstrukcije ne sadrži pukotine većih dimenzija od kritičnih, povećava se sigurnost konstrukcije od loma. Dimenzioniranje se tada može provesti na temelju poznatog dopuštenog naprezanja. Na formiranje pukotine na slobodnoj površini dominantno je stanje površine. Poznavanje rasta pukotine posebno je važno pri planiranju kontrolnih pregleda i remonta konstrukcije. Koristeći zakonitosti djelovanja promjenjivog opterećenja i rasta pukotine i poznavajući pojave koje se dešavaju na vršku pukotine, kao što je napr. koncentracija naprezanja, ovaj pristup daje opće kvalitativno i kvantitativno rješenje za niz parametara u praksi. Dobiveni eksperimentalni podaci su osnova za analizu stanja naprezanja i deformacije u blizini vrška pukotine. Ispitivanje epruvete s pukotinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrška pukotine i polazi od pretpostavke da je materijal epruvete homogen, što

znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu neposredno prenijeti na odgovarajuću konstrukciju. Određivanje parametara rasta zamorne pukotine podrazumijeva ispitivanje brzine rasta te pukotine i faktora C i m u Parisovoj jednadžbi. Kombinirano ispitivanje dinamičke čvrstoće epruveta sa zarezom i otpornosti na pukotine udarnim ispitivanjem izvršeno je na Charpy epruvetama, da bi se na kraju izradio σ - N dijagram, slika 8. Dinamička čvrstoća određena je metodom savijanja konzole, a definirana je kao naprežanje pri broju promjena opterećenja $N = 10^7$. Dinamička čvrstoća σ_D definirana je dakle kao zbroj srednjeg naprežanja σ_m i amplitude naprežanja σ_a i iznosi 198,3 MPa, slika 10. Udarno ispitivanje epruveta s pukotinom podrazumijeva ispitivanje osjetljivosti na pukotine kojom je dobivena Wöhlerova krivulja. Nakon loma epruvete izmjerena je duljina pukotine na pet mjesta, a srednja veličina s pripadajućom ukupnom energijom udara E_T prikazana je na E_T -a dijagramu, slika 10. Početak dijagrama je na dubini zareza od 2 mm, gdje je ukupna energija 83,99 J, a za duljinu pukotine 3 mm ukupna energija je 42,82 J. Pri duljini pukotine od 6 mm ukupna energija iznosi 2,79 J.

Stvarne pukotine koje se pojavljuju u realnim konstrukcijama su vrlo oštri zarez kod kojih je polumjer zaobljenja veličine dimenzija kristalne rešetke. Takvu geometriju pukotine teško je izraditi mehaničkom obradom. U radu je korištena epruveta s jednostavnom geometrijom koja je izrađena mehaničkom obradom. Izabrani materijal je DIN 42CrMo4V. Na temelju teorijske analize i eksperimentalnih rezultata provedenih u ovom radu može se zaključiti sljedeće:

1. Ispitivanje epruvete sa zarezom, kao i s iniciranom pukotinom, rađeno je u cilju određivanja udarnih svojstava i parametara mehanike loma. Poznavanje parametara koji određuju brzinu širenja pukotine u predkritičnoj fazi od velike je važnosti za procjenu vijeka trajanja ciklički opterećene konstrukcije, odnosno za utvrđivanje intervala kontrolnih pregleda.
2. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta s pukotinom pokazuju standardna odstupanja. Dobiveni podaci o osjetljivosti prema pukotinama su od koristi za ocjenu opasnosti od grešaka tipa pukotine i njihovih značajki kod čelika DIN 42CrMo4V u eksploataciji.
3. Eksperimentalne metode se u novije vrijeme sve više koriste mogućnostima koje pružaju računala, kako za prikupljanje podataka mjerenja tako i za njihovu obradu.

LITERATURA

- [1] CUI, W.: *A state-of-art review on fatigue life prediction methods for metal structures*, Marine Science and Technology, 7 (2002), 43-56.

- [2] AHMADI, A.; ZENNER, H.: *Simulation of microcrack growth for different load sequences and comparison with experimental results*, Int. J. of Fatigue, 27, (2005), 853-861.
- [3] KANG, K.J.; BEOM, H.G.: *Plastic zone size near the crack tip in a constrained ductile layer under mixed mode loading*, Engineering Fracture Mechanics, 66, (2000), 257-268.
- [4] IRWIN, G. R.; WELLS, A.A.: *Continuum-Mechanics View of Crack Propagation*, Metallurgical Review, 10, (1965), 223-270.
- [5] BUEHLER, M. J.; ABRAHAM, F. F.; GAO, H.: *Hyperelasticity governs dynamic fracture at a critical length scale*, Nature, 426, (2003), 141-146.
- [6] TOSAL, L.; RODRIGUEZ, C.; BELZUNCE, F.J.; BETEGON, C.: *Comparison of the static and dynamic fracture behaviour of an AE-460 structural steel*, Engineering Fracture Mechanics, 66, (2000), 537-549.
- [7] BESSON, J.; DEVILLERS-GUERVILLE, L.; PINEAU, A.: *Modelling of scatter and size effect in ductile fracture: application to thermal embrittlement of duplex stainless steels*, Engineering Fracture Mechanics, 67, (2000), 169-190.
- [8] STRAUB, D.: *Generic approaches to risk based inspection planning for steel structures*, ETH PhD theses, Zurich, 2004.
- [9] BECKER, T. L.; CANNON, R. M.; RITCHIE, R.O.: *Statistical fracture modelling: crack path and fracture criteria with application to homogeneous and functionally graded materials*, Engineering Fracture Mechanics, 69, (2002), 1521-1555.
- [10] SIH, G. C.; JONES, R.: *Crack size and speed interaction characteristics at micro-, meso- and macro-scale*, Theoretical and Appl. Fracture Mechanics, 39, (2003), 127-136.
- [11] WILLIAMS, M. L.: *On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack*, J. of Applied Mechanics, March (1957), 101-106.
- [12] GRIFFITH, A. A.: *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions of Royal Society of London, 221, (1920), Series A, 163-198.
- [13] GREEN, A. E.; SNEDDON, I. N.: *The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Flat Elliptical Crack in an Elastic Solid*, Proc of Cambridge Phil Soc, 46, (1950), 159-164.
- [14] ERIJAN, S.: *Stress Intensity Factors for Edge Cracks in Round Bars*, Engineering Fracture Mechanics, 37, (1990), 805-812.
- [15] DONOSO, J. R.; LABBE, F.; ARGOMEDO, H.: *A calibration function for notched cylindrical tension specimens*, based on the common format equation: numerical and experimental data analysis, Engineering Fracture Mechanics, 54, (1996), 617-628.
- [16] SMITH, R. A.: *A Simplified Method of Predicting the Rates of Growth of Cracks Initiated at Notches*, Fracture Mechanics in Engineering Practice (editor, P. Stanley), Proc. of Annual Conf. of Stress Analysis Group, Uni. of Sheffield, England, Applied Science Publishers, Ltd. London, 1977.

- [17] SMITH, D.G.; SMITH, C.W.: *Photoelastic Determination of Mixed Mode Stress Intensity Factors*, Engineering Fracture Mechanics, 4, (1972), 357-366.
- [18] BROWN, M. W.; MILLER, K. J.: *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, Mech. Eng. Publication Limited, London, 1989.
- [19] FORMAN, R. G.; KEARNEY, V.E.; ENGLE, R.M.: *Numerical analysis of crack propagation in a cyclically loaded structure*, ASME Trans., J. Basic Engineering, 89, (1967), 459-464.
- [20] RICHEY III, E.: *Empirical modeling of environment-enhanced fatigue crack propagation in structural alloys for component life prediction*, NASA-CR-198231, Hampton, Virginia, 1995.
- [21] RUBIO, L.; ERNANDEZ_SAZ, J.; NAVARRO, C.: *Determination of dynamic fracture - initiation toughness using three - point bending tests in a modified Hopkinson pressure bar*, Experimental Mechanics, 43, (2003), 379-386.
- [22] MERAH, N.: *DC Potential drop calibration in creep-fatigue loading conditions*, J.of Testing and Evaluation, 28, (2000) 301-306.
- [23] HICKS, M. A.; PICKARD, A. C: *A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination*, Int. Journal of Fracture, 20, (1982), 91-101.
- [24] ZRILIC, M.; BURZIC, Z. CVIJOVIC, Z.: *Fracture toughness and crack resistance of steam pipeline steel in initial and used states*, Strength of Materials, 36, (2004), 47-58.
- [25] CARPINTERI, A.; CORNETTI, P.; UGNO, N.; SAPORA, A.; TAYLOR, D.: *A finite fracture mechanics approach to structures with sharp V-notches*, Engineering Fracture Mechanics, 75, (2008), 1736-1752.