

DOLOČEVANJE HITROSTI ŠIRJENJA UTRUJENOSTNE RAZPOKE V ZVARNEM SPOJU PRI MAJHNIH PRIRASTKIH

DETERMINING THE FATIGUE-CRACK GROWTH RATE IN WELDED JOINTS FOR SMALL FATIGUE-CRACK EXTENSION

Jože Predan, Nenad Gubelj, Maks Oblak, Janko Legat

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
jozef.predan@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2001-12-05; sprejem za objavo - accepted for publication: 2002-05-08

Standardi in dokumenti za določitev hitrosti širjenja razpoke predvidevajo uporabo standardnih preizkušancev, na katerih je mogoče meriti dolžino razpoke od nekaj deset do nekaj sto milimetrov prirastka. Problem postaja težaven pri zvarnih spojih, kadar se merijo prirastki razpoke na skupni razdalji le nekaj milimetrov. Za to so poglaviti razlogi naslednji: utrujanje poteka z relativno nizko amplitudo faktorja intenzitete napetosti v področju utrujenostnega praga, mikrostrukturalna in trdnostna heterogenost zvarnega spoja, zaostale napetosti kot posledica varjenja, med utrujanjem se način odpiranja razpoke lokalno spreminja iz enoosno nateznega na ravninsko strižno in nasprotno. Omenjeni dejavniki se kažejo z izrazito neurejeno sliko hitrosti širjenja utrujenostne razpoke. V prispevku je opisan postopek za predobdelavo eksperimentalno izmerjenih vrednosti (prirastek razpoke, št. nihajev), ki omogoča zanesljivejšo določitev hitrosti širjenja utrujenostne razpoke v zvarnem spoju za majhne prirastke do zloma, ko faktor intenzitete napetosti preseže lomno žilavost.

Ključne besede: zvarni spoj, utrujenostna razpoka, prag, intenziteta, faktor napetosti

Standards and documents for determining crack growth rate envisage the use of standard specimens on which it is possible to measure the length of a crack from around ten to around a hundred millimeters. The problem becomes difficult in welding joints in the case when a crack length increment is measured on the total distance of just a few millimeters. The main reasons are follows:

- the fatigue is performed at a relatively low amplitude stress intensity level in the region of the threshold.
- the microstructure and the strength heterogeneity of the welding joint,
- the residual stresses as an effect of welding a consequence of the welding process
- the local change of load modes from one-axis tensile stress to plane shear stress and vice versa.

The above-mentioned factors are reflected in the results with a clearly disarranged dependence on fatigue-crack growth rate. This paper outlines a procedure for the pre-processing of experimentally measured values (crack-length increment, number of cycles) to make it possible to more reliably determine fatigue-crack growth rate in the welding joint for a low crack-length increment.

Key words: welded joint, fatigue crack, threshold, stress, intensity factor

1 UVOD

Celovitost lomnega vedenja materiala vsebuje poleg lomnomehanskega preizkušanja tudi določitev hitrosti širjenja utrujenostne razpoke. Izmerjeni parametri za določitev te hitrosti omogočajo določitev števila ciklov obremenitve do kritične dolžine razpoke pri nominalni obremenitvi.

Parametri za določitev hitrosti širjenja utrujenostne razpoke so podani z enim od zakonov^{1,2,3}. V primeru Paris-Erdoganovega zakona je podano utrujenostno širjenje razpoke (da/dN) z enačbo:

$$\frac{da}{dn} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

kjer sta da/dN hitrost širjenja razpoke in ΔK obseg faktorja intenzitete napetosti med utrujanjem, C in m pa sta konstanti materiala.

Obseg faktorja intenzitete napetosti ΔK določamo glede na velikost obremenitve in trenutno dolžino utrujenostne razpoke na upogibnem preizkušancu:

$$K = \frac{(F_{\max} - F_{\min})S}{BW^{1.5}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

kjer je $f(a/W)$ oblikovna funkcija intenzitete napetosti, ki je za standardni⁴ upogibni preizkušanec:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{0.5} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left[2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right] \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{1.5}} \quad (3)$$

Ustrezno enačbi (2) lahko vrednost K_{\max} določimo z izrazom:

$$K_{\max} = \frac{F_{\max} S}{BW^{1.5}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

Material izkazuje poleg odpornosti proti utrujenostnem širjenju razpoke tudi odpornost proti stabilnemu širjenju le-te. Slednjo opisujejo parametri mehanike loma (K_I , J_I ali $CTOD$), ki jih dobimo z lomnomehanskimi preizkusi. Zaradi tega je smiselno obe vrsti preizkusov, tj. za določitev hitrosti širjenja utrujenostne

razpoke ter za določitev parametrov mehanike loma, opraviti kar na istem preizkušancu, s čimer prihranimo število preizkušancev, čas izdelave in preizkušanja.

Glavna težava pri tem preizkusu je, da mora utrujanje za določitev hitrosti širjenja utrujenostne razpoka potekati z dovolj nizkim maksimalnim faktorjem intenzitete napetosti K_{max} , ki je omejen s standardi^{4,5} za lomnomehanske preizkuse. Nizka vrednost maksimalnega faktorja intenzitete napetosti K_{max} ($K_{max}/E \leq 1,5 \cdot 10^{-4} \sqrt{m}$) pri razmerju $R = F_{min}/F_{max}$ in s tem obseg faktorja intenzitete napetosti ΔK povzroča, da utrujanje poteka v bližini praga utrujenostnega širjenja razpoka ΔK_{th} . Druga težava je v tem, da je lahko celotna dolžina utrujenostne razpoke le nekaj milimetrov, število točk pa mora biti zadosti veliko za numerično diferenciranje, tako da je treba zapisovati število ciklov pri manjših prirastkih razpoke Δa ($\Delta a = 0,1 - 0,2$). Zaradi tega so točke diferenčnih količnikov $\Delta K-da/dN$ porazdeljene neenakomerno, s čimer je lahko zmanjšana zanesljivost določevanja parametrov utrujenostnega širjenja razpoka. V prispevku je prikazan potek utrujanja s konstantno najvišjo silo utrujanja in konstantno amplitudo sile pri majhnih prirastkih razpoke v bližini praga utrujenostnega širjenja le-te.

2 MATERIALI IN IZVEDBA ZVARNEGA SPOJA

Eksperimentalne raziskave so bile opravljene na nizkolegiranem jeklu s povišano trdnostjo NIOMOL 490K (stopnje HT50). Poboljšano jeklo NIOMOL 490K spada v skupino drobnozrnatih nizkolegiranih jekel, ki se uporabljajo za izdelavo varjenih jeklenih konstrukcij.

Za dodatni material smo izbrali dve vrsti izdelkov SŽ Elektrod Jesenice, in sicer FILTUB 75 in VAC 60, ki sta namenjeni za doseg stanja povišane (FILTUB 75) oz. znižane trdnosti (VAC 60). Kemična sestava osnovnega materiala in obeh dodatnih materialov je podana v preglednici 1.

Preglednica 1: Kemična sestava osnovnega materiala in dodatnih materialov v masnih odstotkih

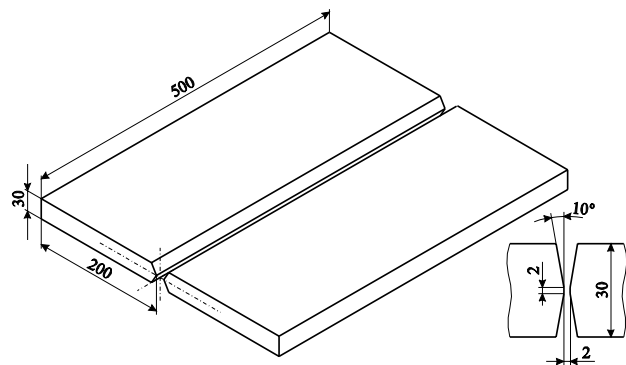
Table 1: Chemical composition of base metal and consumable in weight percent

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
FILTUB	0,040	0,16	0,95	0,011	0,021	0,49	0,42	2,06
NIOMOL	0,123	0,33	0,56	0,003	0,002	0,57	0,34	0,13
VAC 60	0,096	0,58	1,24	0,013	0,160	0,07	0,02	0,03

Preglednica 2: Mehanske lastnosti osnovnega materiala in dodatnih materialov

Table 2: Mechanical properties of base metal and consumable

Material	Oznaka	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	M R _{p0,2,ZM} / R _{p0,2,OM}	Charpy Cv J/80 mm ²
Visokotr.	FITUB 75	648	744	1,19	>40 J pri -60 °C
Osnovni	NIOMOL 490	545	648	-	>60 J pri -60 °C
Nizkotr.	VAC 60	469	590	0,86	>80 J pri -60 °C



Slika 1: Priprava varjenca

Figure 1: Welding preparation

Varjenje smo opravili na varjencu z dimenzijami 500x200x30 mm v zvarnem žlebu s kotom 10°, kot je prikazano na **sliki 1**.

Varjenje z žico FILTUB 75 smo izvajali s predgrevanjem na 55 °C, z žico VAC 60 pa brez predgrevanja. Varjenje je bilo izvršeno s postopkom MAG postopkom (82 % Ar in 18 % CO₂). Vnos toplote je bil v območju 16-20 kJ/cm, kar ustreza ohlajevalnemu času $\Delta t_{8/5} = 9-12$ s. Temperatura zavarjenca med varjenjem ni presegla 150 °C.

3 EKSPERIMENTALNE MERITVE

Iz zvarjenega talona so bili izdelani standardni preizkušanci z zarezo skozi debelino v sredini zvara, kot je prikazano na **sliki 2**. Debelina B in širina W preizkušanca sta bili enaki: $B = W = 25$ mm. Globina mehanske zareze pred začetkom preizkušanja je bila 3 mm.

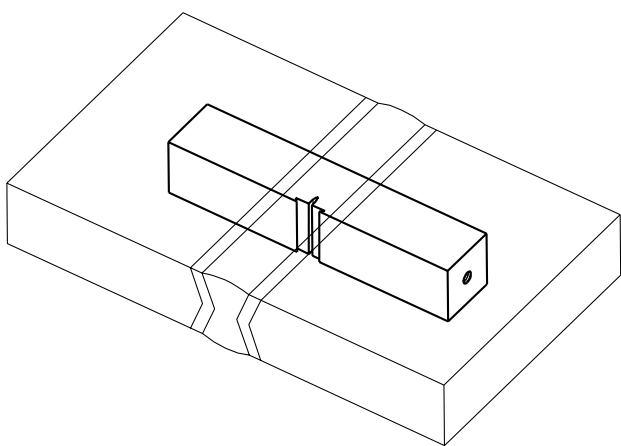
Utrujenostno širjenje razpoke smo spremljali z mikroskopom, kot je shematsko prikazano na **sliki 3**. Med spremljanjem utrujenostega širjenja razpoke smo zapisovali vrednosti prirastka razpoke Δa v odvisnosti od števila ciklov N .

Režimi utrujanja za posamezne preizkušance so podani v **preglednici 3**.

Preglednica 3: Režimi utrujanja lomnomehanskih upogibnih preizkušancev

Table 3: Fatigue loading regimes of three-point-bend specimens

	a mm	F _{min} kN	F _{max} kN	R	a/W	f(a/W)	K _{max} MPa√mm	ΔK MPa√mm	N ·10 ³ ciklov
AV	2,50	7,8	31,2	0,25	0,10	3,37	840,9	630,6	0,0
	4,76				0,19	4,55	1140,3	855,5	76,0
	7,62	12,7	31,1	0,41	0,30	6,10	1526,1	904,4	110,6
AN	3,02	6,5	28,3	0,23	0,12	3,66	833,7	644,9	0,0
	5,45				0,22	4,90	1116,2	843,3	102,5
	7,64	10,4	25,7	0,41	0,31	6,12	1269,3	711,7	192,5

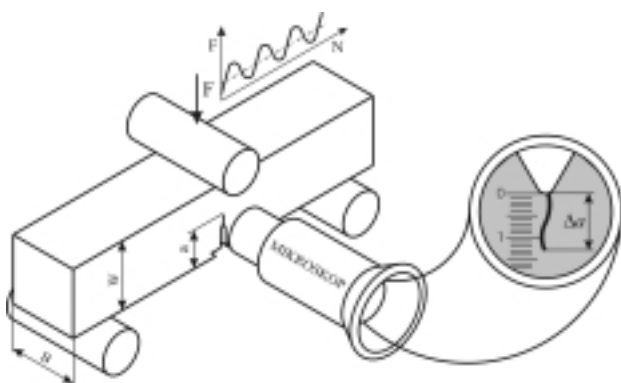


Slika 2: Položaj preizkušanca z zarezo skozi debelino v varjencu

Figure 2: Location of specimen with through thickness notch in welded plate

Značilen prikaz eksperimentalnih vrednosti prirastka razpoke je podan na **sliki 4**.

Po končanem utrujanju je bil v skladu z GTP EFAM 94⁵ opravljen lomnomehanski preizkus CTOD za določitev kritične vrednosti parametra mehanike loma



Slika 3: Spremljanje utrujenostnega širjenja razpoke z mikroskopom

Figure 3: Observing of fatigue-crack growth with microscope

Režim utrujanja je bil določen z nastavitvijo maksimalne F_{max} in minimalne F_{min} sile na preizkuševalnem stroju. Vrednosti sil F_{max} in F_{min} in s tem razmerje R je bilo med utrujanjem za posamezni režim konstantno.

pri iniciaciji stabilnega širjenja razpoke. Značilne eksperimentalne vrednosti sile iniciacije F_i in $CTOD_i$ pri iniciaciji stabilnega širjenja razpoke so podane v **preglednici 4**.

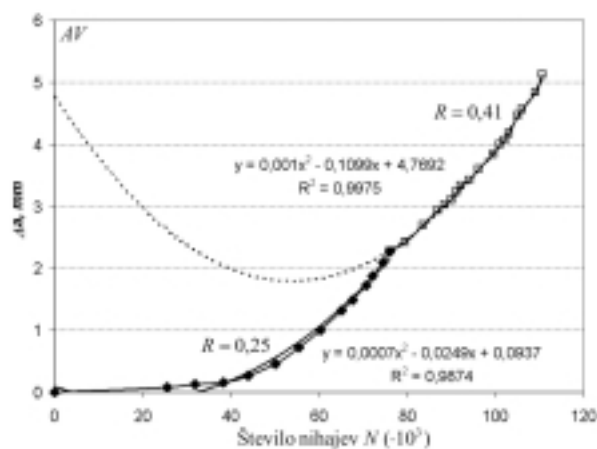
Preglednica 4: Eksperimentano izmerjene vrednosti CTOD pri iniciaciji stabilnega širjenja razpoke

Table 4: Experimentally measured values of CTOD tests for stable crack-growth initiation

Vzorec	a _i /W	F _i kN	K _{max} MPa√mm	CTOD mm
AV	0,601	20,99	2543,8	0,0476
AN	0,467	35,30	2715,8	0,0789

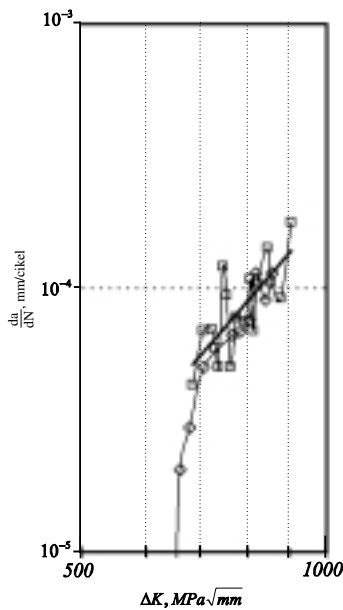
4 ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV

Na osnovi eksperimentalno izmerjenih vrednosti $\Delta a-N$, ki so prikazane na **sliki 4**, smo po metodi najmanjših kvadratov določili diferencialne količnike ΔK , ki so kot pari vrednosti $\Delta K-da/dN$ prikazani na **sliki 5**. S te slike je razvidno, da so vrednosti $\Delta K-da/dN$ neenakomerno razporejene, s čimer je natančnost določitve



Slika 4: Odvisnost med prirastkom razpoke in številom nihajev N pri dveh režimih utrujanja

Figure 4: Crack extension Δa versus cycle number N for two fatigue loading regimes

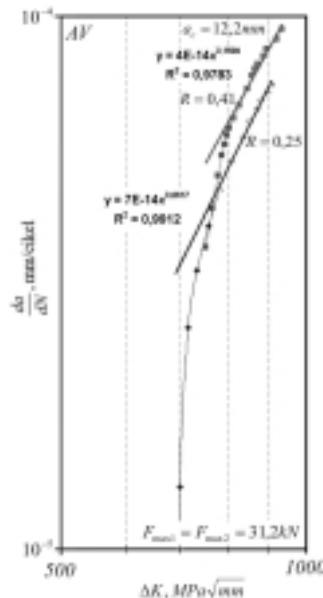


Slika 5: Vrednosti ΔK - da/dN , določene z neposrednim odvajanjem odčitanih vrednosti Δa - N

Figure 5: ΔK - da/dN pairs obtained by derivation of experimentally measured values Δa - N

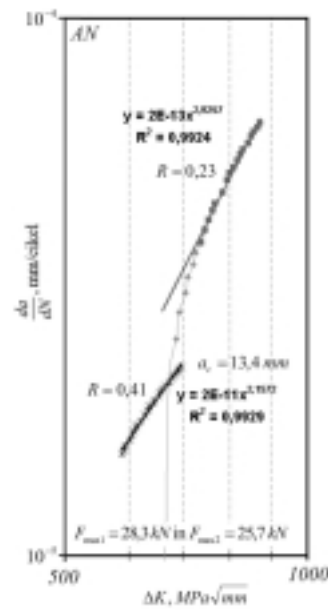
parametrov (C , m) Paris-Erdoganovega zakona dvomljiva.

Neenakomerna odvisnost med amplitudo faktorja intezitete napetosti in hitrosti širjenja razpoke se pojavlja zaradi utrujanja v bližini praga utrujenostnega širjenja razpoke kot tudi zaradi majhnih prirastkov razpoke. Problem je mogoče rešiti, če odvisnost Δa - N aproksimiramo v polinomsko krivuljo z zadosti visokim koeficientom regresije $R > 0,98$, kot je prikazano na **sliki 4**.



Slika 6: Krivulji hitrosti utrujenostnega širjenja razpoke na preizkušancu AV

Figure 6: Fatigue-crack growth rate for specimen AV



Slika 7: Krivulji hitrosti utrujenostnega širjenja razpoke na preizkušancu AN

Figure 7: Fatigue-crack growth rate for specimen AN

Obdelava količnikov ΔK - da/dN iz apriksimirane polinomске funkcije omogoča določitev parametrov C in m Parisovega zakona, kot je prikazano na **sliki 6** za visokotrdnosti preizkušane AV oz. na **sliki 7** za nizkotrdnostni preizkušane AN.

Na **sliki 6** so prikazane hitrosti širjenja utrujenostne razpoke za oba režima utrujanja ($R_1 = 0,25$ in $R_2 = 0,41$) na preizkušancu AV.

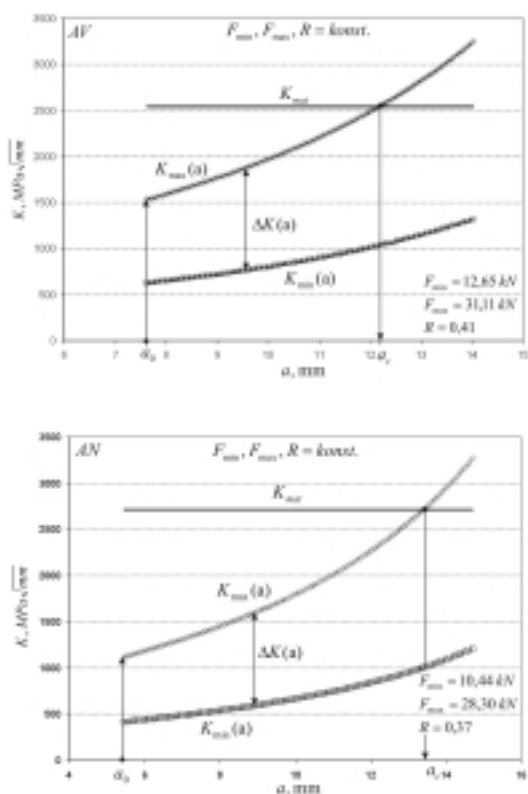
Vrednosti $F_{max,1}$ in $F_{max,2}$ sta ostali pri obeh režimih utrujanja približno enaki ($F_{max} = 31,2$ kN), zaradi tega je mogoče opaziti, da se "linearni" del utrujenostne premice z naraščanjem obremenitvenega razmerja R premika k višji hitrosti utrujenostnega širjenja razpoke da/dN pri enakem ΔK .

Na **sliki 7** so prikazane hitrosti širjenja utrujenostne razpoke za oba režima utrujanja na preizkušancu AN, pri čemer je utrujanje potekalo pri različnih silah $F_{max,1} = 28,3$ kN in $F_{max,2} = 25,7$ kN. Zaradi spremembe maksimalne sile utrujanja so bile razmere pri efektu zapiranja razpoke⁶ spremenjene, tako da se je zmanjšal eksponent hitrosti širjenja razpoke z $m = 2,93$ na $m = 2,16$.

Pri znani vrednosti K_{mat} lahko določimo kritično dolžino utrujenostne razpoke a_c . Postopek za določitev kritične dolžine utrujenostne razpoke je prikazan na **sliki 8a** za visokotrdnostni preizkušane AV in na **sliki 8b** za nizkotrdnostni preizkušane AN. Postopek za določitev a_c temelji na predpostavki, da do nestabilnega širjenja razpoke pride pri njeni kritični dolžini, ko je izpolnjen pogoj:

$$K_{max}(a) \geq K_{mat} \tag{5}$$

torej, ko je vrednost faktorja intezitete napetosti K_{max} , ki je posledica maksimalne sile utrujanja F_{max} , večja od



Slika 8: Prikaz naraščanja K_{max} , K_{min} in ΔK med utrujanjem s konstantno amplitudo sile do kritične vrednosti faktorja intezitete napetosti K_{mat} a) za preizkušane AV in b) za preizkušane AN

Figure 8: Increasing of K_{max} , K_{min} and ΔK under constant load amplitude until critical value of K_{mat} for specimen a) AV and b) AN

odpornosti materiala proti stabilnemu širjenju razpoke K_{mat} .

Tako smo kritične vrednosti dolžine razpoke a_c določili v presečni točki med K_{mat} in $K_{max}(a)$ za vsak preizkušane posebej, kot je prikazano na **sliki 8**.

Ob znanih vrednostih kritične dolžine a_c in vrednosti parametrov C , m iz Paris-Erdoganovega zakona lahko določimo kritično hitrost širjenja razpoke da/dN ter navsezadnje število ciklov ΔN , potrebnih, da dosežemo kritično dolžino razpoke a_c :

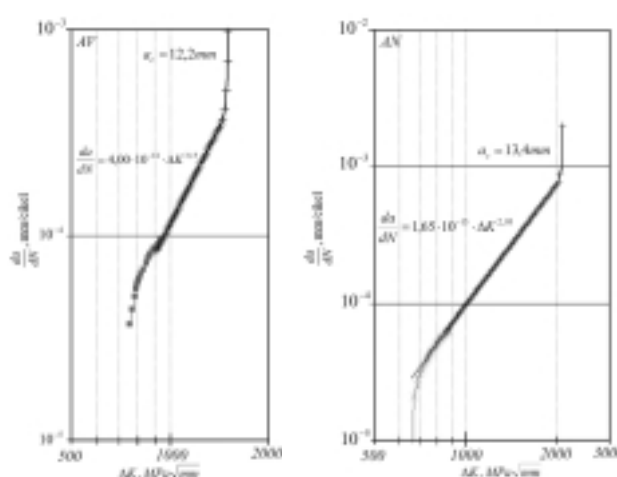
$$\Delta N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C \cdot \Delta K^m} \quad (6)$$

Izračunane vrednosti ciklov in kritične dolžine razpoke so podane v **preglednici 5**.

Preglednica 5: Kritične dolžine razpoke a_c in število ciklov ΔN , potrebnih, da dosežemo rast razpoke od a_i do a_c

Table 5: Critical length of crack and number of cycles for crack growth from a_i up to a_c

Vzorec	ΔF kN	a_i mm	a_c mm	N $\cdot 10^3$ ciklov
AV	15,0	8,0	12,2	45,1
AN	15,0	8,0	13,4	56,3



Slika 9: Celotna sigmoidalna krivulja utrujenostnega širjenja razpoke za preizkušane a) AV in b) AN

Figure 9: Completed fatigue-crack growth sigmoidal curve for specimen a) AV and b) AN

Na osnovi opravljene analize je razvidno, da z utrujanjem v področju praga utrujenostnega širjenja razpoke dobimo opisan začetni del utrujenostne sigmoidalne krivulje, medtem ko z določitvijo kritične dolžine razpoke a_c pri kritični vrednosti K_{mat} oz. ΔK dobimo končni del utrujenostne sigmoidalne krivulje. V primeru, ko je še vmesno področje, ki povezuje začetni in končni del utrujenostne sigmoidalne krivulje, določeno s parametri Paris-Erdoganovega zakona, imamo definirano celotno sigmoidalno krivuljo utrujenostnega širjenja razpoke za podan režim utrujanja, kot je prikazano na **sliki 9a** za visokotrnostni preizkušane AV oz. **9b** za nizkotrdnostni preizkušane AN.

Sigmoidalne krivulje na **slikah 9a** oz. **9b** veljajo le za eksperimentalno opravljene režime utrujanja. V primeru spreminjanja režima se razmere (K_{max} , ΔK) bistveno spremenijo, kar povzroči zamik in spremembo nagiba oz. parametrov Paris-Erdoganovega zakona. Omenjen učinek je posebej izrazit pri zvarnih spojih, ko zaostale napetosti še dodatno vplivajo na utrujanje.

5 SKLEPI

V članku je prikazan postopek, s katerim je mogoče standardni lomnomehanski preizkušane uporabiti za določitev hitrosti širjenja razpoke in odpornosti proti stabilnem širjenju le-te.

Za eksperimentalno dobljene odvisnosti prirastka razpoke Δa in števila nihajev N ni primerno uporabiti direktno določanje diferencialnih količnikov, ker že manjši odmiki od smeri napredovanja utrujenostne razpoke podajajo neurejeno sliko ΔK - da/dN za hitrost širjenja razpoke.

Z vpeljavo aproksimacijske krivulje za eksperimentalno izmerjene vrednosti Δa - N je mogoče dobiti

vrednosti parametrov C in m Paris-Erdoganovega zakona za podan režim utrujanja.

Rezultati Paris-Erdoganovega zakona za hitrost širjenja utrujenostne razpoke kažejo spremembo parametrov C in m za vsak režim posebej. Sprememba parametrov C in m je posledica spremembe razmer med utrujenostnim širjenjem razpoke, ki je najbolj izrazita pri spremembi maksimalne sile utrujanja F_{max} .

V raziskavi smo pokazali, da je mogoče standardni preizkušane uporabiti za celotni opis lomnega vedenja od začetka oblikovanja utrujenostne razpoke do končnega zloma.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo SŽ Acroni Jesenice za osnovni material NIOMOL 490K ter SŽ Elektrode Jesenice za dodatna materiala in izvedbo zvarnih spojev.

6 LITERATURA

- ¹ Forman R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, J. Basic Engng., 89(1967) 77-92
- ² Walker, E. K., The effect of the stress ration during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6, The effect of enviroment and complex load history on fatigue life, ASTM-STP 462, ASTM, Philadelphia, ZDA (1967), 1-15
- ³ Paris P. and Erdogan, F., A critical analysis of crack propagation laws, Journal Basic Engineering, (1963) 528-534
- ⁴ BS 7448: Part 2: 1997: Fracture mechanics toughness tests, Part 2. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials, British Standards Institution, London, 1997
- ⁵ Schwalbe K-H., Neale B. K., Heerens J. The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials, EFAM GTP 94, Geesthacht, 1994
- ⁶ Ebler W., Fatigue crack clousure under cyclic tension, Engin. Fract. Mech., 2(1970)1