

VEDENJE WP-PREIZKUŠANCA PRI UTRUJANJU

THE BEHAVIOUR OF A WP-SPECIMEN DURING FATIGUE

Vladimir Gliha, Danilo Rojko

Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
vladimir.gliha@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2002-10-17; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-03-17

Analizirali smo vedenje WP-preizkušanca med širjenjem utrujenostne razpoke. Zaradi vse večje razpoke se togost preizkušanca pri tem zmanjšuje. Če je ciklična obremenitev izvedena pri kontroli obremenitve, se razpon intenzitete napetosti in hitrost širjenja razpoke ves čas povečujeta. Širjenja razpoke je zato težje nadzirati. Če je ciklična obremenitev izvedena pri kontroli pomika, pa se zaradi vse manjše togosti razpon obremenitve med širjenjem razpoke zmanjšuje. Kljub temu se razpon intenzitete napetosti in hitrost širjenja razpoke povečujeta, vendar počasneje kot pri kontroli obremenitve. Prav zaradi tega je nadzor širjenja razpoke nekoliko lažji.

Ključne besede: WP-preizkušavec, razpoka, togost, ciklična obremenitev, nadzor obremenitve, kontrola pomika, razpon obremenitve, intenziteta napetosti, hitrost širjenja razpoke

The behaviour of a WP-specimen was analysed during fatigue-crack spreading. The stiffness of the specimen decreases due to the increasing crack length. If cyclic loading is applied in the load-control mode the crack-tip stress-intensity range and the crack propagation rate increase continuously. Crack spreading is difficult to control. If cyclic loading is applied in the displacement-control mode the stress range decreases because of the ever lower stiffness. In spite of this crack-tip stress-intensity range and the crack propagation rate increase, but more slowly than in the load-control mode. This is the reason for better crack-spreading control.

Key words: WP-specimen, crack, stiffness, dynamic loading, load-control mode, displacement-control mode, loading range, stress-intensity range, crack propagation rate

1 UVOD

Polje zaostalih napetosti vpliva na odpornost realnih zvarov proti lomu, če so v njih ostre ravninske napake. Vpliv teh napetosti ni vključen v vrednost lomne žilavosti, ki je eksperimentalno določena pri standardiziranih majhnih lomno-mehanskih preizkušancih (CT in SENB), saj so ti za to premajhni. Zato ni priporočljivo uporabljati teh podatkov za ocenitev vplivnosti obstoječih napak v zvarih, ki so v varjenem stanju. Razen tega pa upogibna obremenitev zveča vpetost konice razpoke, kar privede do preveč konzervativnih podatkov o lomni žilavosti zvarov. Nasprotno pa so WP-preizkušanci dokaj razsežni vzorci zvara z razpoko, v katerem so tudi zaostale napetosti, obremenitev pa je čisto natezna. Tako se v vrednostih lomne žilavosti, ki jih eksperimentalno določimo na WP-preizkušancih, zrcali tudi vpliv zaostalih napetosti.

Ponavadi se razpoko na CT- in SENB-preizkušancih pripravi z cikličnim obremenjevanjem - utrujanjem pri kontroli pomika. Ta način obremenjevanja omogoča dober nadzor amplitude obremenitve in širjenja - propagacije utrujenostne razpoke, saj se obremenitev med širjenjem razpoke zmanjšuje. Obremenitev lahko tako pravočasno prekinemo, zato je malo verjetno, da bi preizkušanci postali zaradi prevelike razpoke neuporabni za eksperimentalno določitev lomne žilavosti. Ciklično obremenjevanje pri kontroli sile tega ne omogoča, saj se z velikostjo razpoke hitrost širjenja hitro povečuje.

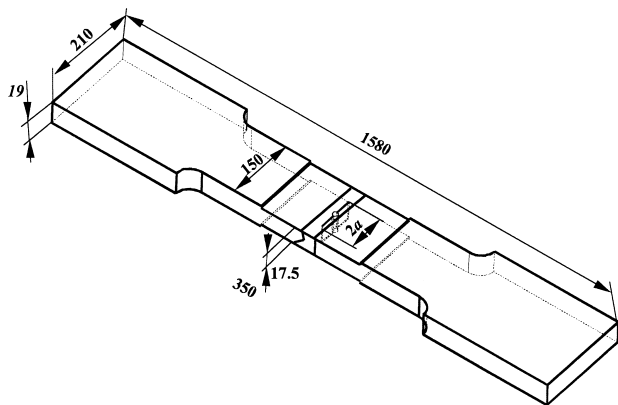
Z uporabo literature in obstoječih predpisov smo analizirali, kako se pri utrujanju spreminja togost WP-preizkušancev. Ker razpoka ne sme biti niti premajhna niti prevelika, je treba širjenje razpoke med utrujanjem nadzirati. Poleg tega morajo biti razpoke predpisane dolžine na vnaprej izbranih področjih zvara.

V članku smo prikazali, zakaj se na WP-preizkušancu utrujenostna razpoka sploh širi, kakšen je vpliv zaostalih napetosti in kolikšna je lahko obremenitev preizkušanca pri utrujanju, da priprava razpoke ne vpliva na vrednost eksperimentalno določene lomne žilavosti soležnega zvara v varjenem stanju.

2 IZHODIŠČE ZA PRIPRAVO RAZPOKE

2.1 Vzorec zvara in razpoka

Oblika in velikost 150 mm širokega WP-preizkušanca, na katerem se z ciklično obremenitvijo v vzdolžni smeri pripravi razpoko v končni velikosti $2a = 75$ mm, sta prikazani na **sliki 1**. Preizkušanci so izrezani iz 19 mm debelega večvarkovnega soležnega zvara K. Prikazana središčna razpoka je v sredini zvara. Zaradi specifičnih potreb pri eksperimentalni določitvi lomne žilavosti zvara ¹ so preizkušanci v merilni razdalji 350 mm stanjšani na 17,5 mm. Natezna plošča s središčno razpoko, ki smo jo uporabili kot model WP-preizkušanca, je skicirana na **sliki 2** ².



Slika 1: WP-preizkušavec za eksperimentalno določitev lomne žilavosti soležnih zvarov ¹

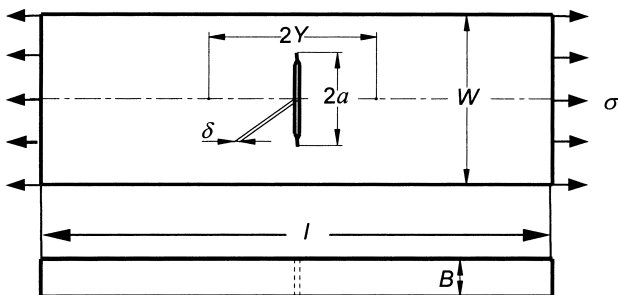
Figure 1: WP specimen for the experimental determination of fracture toughness on butt-welded joints ¹

Če elastično trdno telo z razpoko mehansko obremenimo, razpoka interagira z napetostmi. Če je možno napetostno polje okoli vrha razpoke zadovoljivo natančno opisati z elastično teorijo, je primerno merilo velikosti interakcije faktor intenzitete napetosti K . Za ploščo s središčno razpoko, ki je natezno obremenjena z nominalno napetostjo σ , se K izračuna takole ²:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \cdot (1 - 0,025\alpha^2 + 0,06\alpha^4)} \quad (1)$$

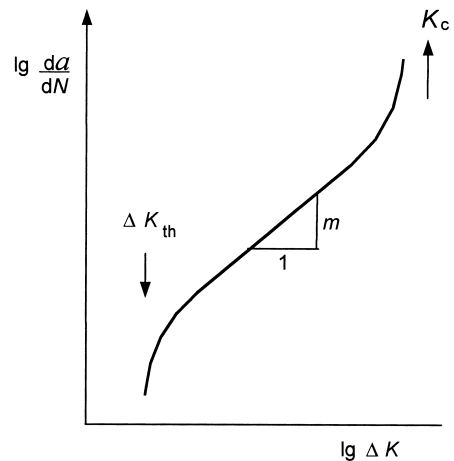
Tu sta a in α dejanska in relativna velikost razpoke ($\alpha = 2a/W$).

Če je trdno telo z razpoko izpostavljeno ciklični obremenitvi, se K spreminja med največjo vrednostjo K_{max} in najmanjšo K_{min} . Morebitno širjenje razpoke je posledica postopne utrujenosti materiala. **Slika 3** prikazuje, kako je pri konstantnem razmerju R ($R = K_{min}/K_{max}$) hitrost širjenja utrujenostne razpoke da/dN odvisna od razpona faktorja intenzitete napetosti ΔK ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$), če je faktor K merilo velikosti interakcije med razpoko in napetostmi v trajanju celotnega obremenilnega cikla. Če je $\Delta K < \Delta K_{th}$, pri čemer je ΔK_{th} prag za širjenje utrujenostne razpoke, se razpoka ne širi. Če se K približuje K_c , kar je kritična



Slika 2: Natezna plošča s središčno razpoko, ki je uporabljena za model WP-preizkušanca ²

Figure 2: Center-cracked tension plate used as the model of the WP-specimen ²



Slika 3: Hitrost širjenja utrujenostne razpoke da/dN je odvisna od razpona faktorja intenzitete napetosti ΔK

Figure 3: Fatigue-crack propagation-rate da/dN depends on the crack-tip stress-intensity range ΔK

vrednost K za zlom, je hitrost širjenja zelo velika. Vmes se razpoka širi v skladu z enačbo 2.

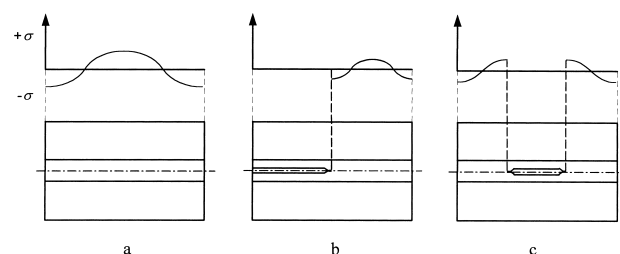
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

Dokler je R konstanten, sta konstanti C and m odvisni od materiala v okolici konice razpoke ³. Za pripravo razpok na lomno-žilavostnih preizkušancih je predpisano razmerje R med 0 and 0,1 ^{4,5}, kar pomeni skoraj utripno ciklično obremenitev.

2.2 Obremenitev konice razpoke z zaostalimi napetostmi

Na **sliki 4a** je prikazan shematski potek zaostalih napetosti v zvarjenem traku, katerih smer je prečna na os soležnega zvara. Na **slikah 4b in 4c** je isti zvar oslavljen s stransko razpoko oziroma s centralno razpoko. Ob predpostavki, da sta obe razpoki narejeni na način, da pri tem ni bilo vpliva na zaostale napetosti, je očitno, da se prejšnje polje zaostalih napetosti (**slika 4a**) spremeni že zaradi same razpoke.

V primeru stranske razpoke je njena konica statično tlačno predobremenjena (**slika 4b**), v primeru centralne



Slika 4: Shematski prikaz prečnih zaostalih napetosti v zvaru: a) zvarjena plošča v varjenem stanju, b) plošča, oslABLJENA s stransko razpoko, c) plošča, oslABLJENA s središčno razpoko

Figure 4: Sketch of residual stresses acting perpendicular to the weld joint axis: a) as-welded plate, b) plate weakened due to an edge crack, c) plate weakened due to a center crack

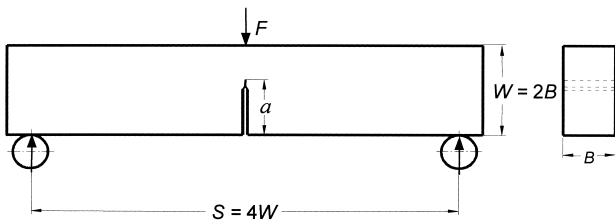
razpoke pa natezno (slika 4c). Zaradi različnega predznaka statične prednapetosti je vpliv na napetostno polje v neposredni okolici konice razpoke v obeh primerih bistveno različen. To se seveda pozna na vrednosti izmerjene lomne žilavosti zvara v varjenem stanju.

Sam nivo zaostalih napetosti ob konicah obeh razpok je odvisen razen od izhodiščnega napetostnega polja, tudi od relativne velikosti razpoke. Ker je pri majhnih lomno-mehanskih preizkušancih, kot sta SENB- in CT-preizkušanca, nosilni prerez zmeraj mnogo manjši od dejanskega nosilnega prereza zvara, so tlačne zaostale napetosti na konici razpoke tako majhne, da jih je mogoče praktično popolnoma zanemariti. Ker pa je WP-preizkušavec zasnovan prav z namenom, da bi bil ustrezno velik vzorec zvara, je nivo nateznih zaostalih napetosti primerljiv z zaostalimi napetostmi v dejanskem zvaru. Te napetosti igrajo določeno vlogo že pri širjenju utrujenostne razpoke, saj vplivajo na razmerje R , od katerega je odvisen prag za širjenje utrujenostne razpoke ΔK_{th} . Prav tako pa vplivajo na izmerjeno lomno žilavost, kar je za realnost presoje vplivnosti obstoječih ravninskih napak na nosilnost zvarov odločilnega pomena.

2.3 Dopustna ciklična obremenitev

Neposredni rezultat interakcije med razpokami in napetostmi je nastanek plastične cone. Pri izdelavi razpoke na lomno-žilavostnih preizkušancih mora biti velikost plastične cone na vrhu razpoke zanemarljiva v primerjavi z velikostjo plastične cone, ki se razvije pri eksperimentalni določitvi lomne žilavosti. Zato je maksimalna velikost faktorja intenzitete napetosti K_{max} v standardih ^{4,5} primerno omejena. To je potreben in zadosten pogoj, da sama priprava razpoke na preizkušancih nima pomembnejšega vpliva na vrednost kasneje izmerje lomne žilavosti. Velikost plastične cone r_y , kar je približen polmer območja, kjer je material plastično deformiran, je odvisna od faktorja intenzitete napetosti K , meje tečenja materiala v najožji okolici vrha razpoke R_p in napetostnega stanja, ki ga opredelimo z n :

$$r_y = \frac{1}{n\pi} \left(\frac{K}{R_p} \right)^2 \tag{3}$$



Slika 5: SENB-preizkušavec, ki je uporabljen za zgled pri določitvi dopustne napetosti WP-preizkušancev ⁵

Figure 5: SENB specimen used as an example to determine allowable stress on WP specimens ⁵

Pri ravninskem napetostnem stanju velja, da je $n = 2$, pri ravninskem deformacijskem pa, da je $n \cong 6$.

Pri določitvi dopustne obremenitve na WP-preizkušancih smo si pomagali s priporočilom za pripravo razpoke na SENB-preizkušancih ⁵. Oblika in relativna velikost tega standardiziranega preizkušanca sta prikazana na sliki 5. Predpostavili smo, da sta enako debela SENB- in WP-preizkušanca ($B = 17,5$ mm) iz enakega materiala. Dopustna napetost na WP-preizkušancih σ_{dop} naj ima za posledico ravno tolikšno intenziteto napetosti K_{max} , kot je dovoljeno na SENB-preizkušancih. V standardu ⁵ je v končni fazi izdelave razpoke obremenitev F_{max} omejena z dopustno obremenitvijo F_{dop} . Ta je odvisna od dimenzij preizkušanca in od lastnosti materiala.

$$F_{max} \leq F_{dop} = \frac{B(W-b)^2 (R_p + R_m)}{4S} \tag{4}$$

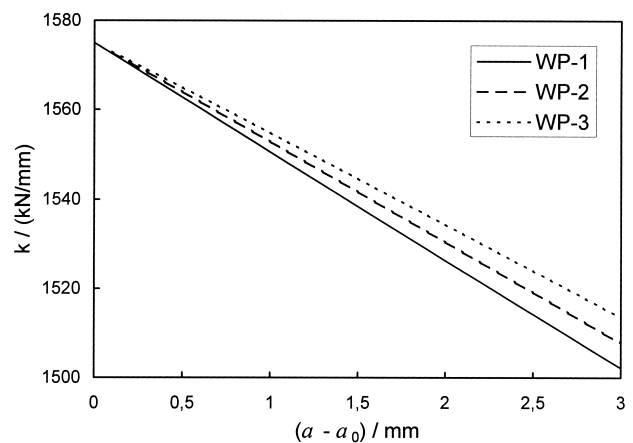
W in B sta širina in debelina SENB preizkušanca, medtem ko sta b in S velikost razpoke ($b = 0,5 W$) in razpon med podporama.

W , b in S so odvisne od B , ki je 17,5 mm (slika 5). R_p in R_m sta napetost tečenja in natezna trdnost materiala, v katerem se nahaja vrh razpoke. To je material vara iz reference ¹ z $R_p = 732$ MPa in $R_m = 765$ MPa. Zaradi varnosti smo obe vrednosti zmanjšali za 10 %. Na osnovi enačbe 4 smo izračunali $F_{max} = 12,89$ kN. Pri $b = 0,5 W$ smo za to obremenitev izračunali faktor intenzitete napetosti K_{max} ²:

$$K_{max} = \frac{6F_{max}}{BW} \sqrt{b} \frac{1,99 - \beta(1 - \beta)(2,15 - 3,93\beta + 2,7\beta^2)}{(1 + 2\beta)\sqrt{(1 - \beta)^3}} = 41,94 \text{ MPa}\sqrt{m} \tag{5}$$

Tu sta b in β dejanska in relativna velikost razpoke ($\beta = b/W$).

Z uporabo enačbe 1 smo pri $a = 37,5$ mm in $\alpha = 0,5$ W izračunali, kolikšni napetosti ustreza $K_{max} = 41,94$



Slika 6: Togost k WP-preizkušanca s središčno razpoko (17,5 x 150 x 350) mm glede na velikost razpoke $a - a_0$ v razponu 3 mm

Figure 6: Stiffness of WP-specimen with a center crack (17,5 x 150 x 350) mm versus crack size $a - a_0$ in the range of 3 mm

MPa \sqrt{m} na WP-preizkušancih. Tako smo dobili velikost dopustne napetosti $\sigma_{\text{dop}} = 103$ MPa. V končni fazi izdelave razpoke tega nivoja napetosti z največjo nominalno napetostjo σ_{max} nismo smeli preseči, sicer bi nastanek razpoke kasneje lahko vplival na vrednost eksperimentalno določene lomne žilavosti.

3 WP-PREIZKUŠANEC

3.1 Togost

Da bi analizirali vedenje WP-preizkušanca pri utrujanju, je treba poznati vpliv velikosti razpoke na njegovo togost. V splošnem je togost k elastičnega trdnega telesa:

$$k = \frac{\delta F}{\delta u} \quad (6)$$

F je obremenitev, u pa pomik točke, v kateri obremenitev deluje.

Togost vsakega trdnega telesa z razpoko je odvisna od njegovih dimenzij, skupaj z velikostjo razpoke, in od lastnosti materiala. Pri majhni amplitudi ciklične obremenitve je določitev togosti enostavna, saj je medsebojna odvisnost F - u linearna. V dovolj debeli plošči se v neposredni okolici konice razpoke vzpostavi ravninsko deformacijsko stanje³.

Privzeli smo, da je področje s povečanimi napetostmi v tistem prerezu WP-preizkušanca, kjer je opaziti vpliv razpoke, izredno majhno v primerjavi s celotnim merilnim območjem. Ta prispevek k pomiku prijemaležca obremenitve je mogoče zanemariti v primerjavi s prispevkom celotne deformacije preizkušanca. Če ima stanjšano merilno področje preizkušanca dimenzije $l = 350$ mm in $B = 17,5$ mm, preostanek nestanjšanega merilnega področja pa $B' = 19$ mm in $l' = 430$ mm, pri čemer je širina povsod $W = 150$ mm, gre pa za ogljikovo jeklo z $E = 210$ GPa, se začetni pomik u_0 pri obremenitvi F in začetna togost k_0 da izračunati takole:

$$u_0 = \frac{F}{WE} \left(\frac{l}{B} + \frac{l'}{B'} \right) \rightarrow k_0 = \frac{BB'WE}{B'l + B'l'} = 739 \text{ MNm}^{-1} \quad (7)$$

Togost WP-preizkušanca smo ocenili pri predpostavkah, da je posledica spremembe velikosti razpoke večje odprtje razpoke oziroma večja deformacija preizkušanca.

1. predpostavka: togost se vidi na odprtju razpoke

V priročniku² je za natezno ploščo s središčno razpoko na razpolago analitični izraz za odprtje razpoke δ (slika 2). Gre za medsebojni pomik dveh nasproti ležečih točk na obeh straneh razpoke, ki ga povzroči napetost σ :

$$\delta = \frac{4\sigma a}{E} \cdot (1 + 0,065\alpha - 0,241\alpha^2 + 3,76\alpha^3 - 6,63\alpha^4 + 4,93\alpha^5) \quad (8)$$

Ko na vrhu razpoke prevladuje ravninsko napetostno stanje, je $E' = E$, ko pa deformacijsko, je $E' = E/(1-\mu^2)$. E in μ sta Youngov modul in Poissonovo število.

Če se pri konstantni napetosti razpoke poveča, se tudi odprtje razpoke poveča iz začetne vrednosti δ_0 na δ . Predpostavili smo, da to vpliva na togost plošče:

$$k = \frac{F}{u_0 + \delta - \delta_0} \quad (9)$$

Z enačbo 9 izračunana odvisnost togosti WP-preizkušanca s slike 1 od velikosti razpoke $a - a_0$ je prikazana na sliki 6 kot WP-1. Začetna velikost razpoke je $a_0 = 34,5$ mm, medtem ko je končna velikost $a_0 + 3$ mm = 37,5 mm.

2. predpostavka: togost se vidi na deformaciji preizkušanca

Iz enačbe 10² smo izračunali pomik u' med dvema točkama na simetrali, ki sta oddaljeni za $2Y$. Ta razdalja zajame tudi razpoko (slika 2).

$$u' = \frac{2Y\sigma}{E'} \sqrt{\frac{\frac{\alpha\pi}{2}}{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}} \left[\frac{2W}{\pi Y} \operatorname{arcch} \frac{\cosh \frac{\pi Y}{W}}{\cos \frac{\alpha\pi}{2}} - \frac{1-\mu}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\sinh \frac{\pi Y}{W}} \right)^2}} + \mu \right] \quad (10)$$

Enačba 10 velja, če je $Y \leq 0,5W$. Naj bo $\mu = 0,3$. Če se razpoka poveča, se poveča tudi u' . Predpostavili smo, da se to kaže na togosti razpoke tako:

$$k = \frac{F}{u_0 + u' - u'_0} \quad (11)$$

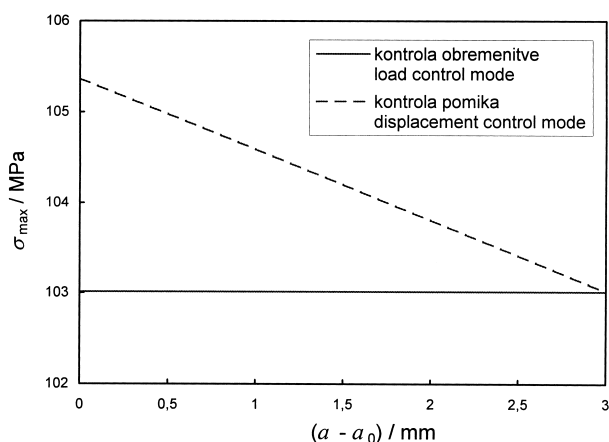
Tu sta u_0 in u'_0 začetna pomika na razdaljah l in $2Y$, u' pa trenutni pomik na razdalji $2Y$.

Ni se enostavno odločiti za uporabo pravega elastičnega modula v enačbi 10. Naj bo $E^* = E$ ali $E^* = E/(1-\mu^2)$. Ob vrhu razpoke je ravninsko deformacijsko stanje, toda v širši okolici ga ni več. Če privzamemo v celotnem preostalem delu merilnega območja ravninsko napetostno stanje, dobimo izraz za k_E , če pa ravninsko deformacijsko stanje, izraz za k_E . Zaradi manjšega modula elastičnosti se k_E zmanjša bolj kot k_E .

Če je $Y = 0,5W$, je z enačbo 11 izračunana odvisnost togosti WP-preizkušanca s slike 1 od velikosti razpoke $a - a_0$ prikazana na sliki 6 kot WP-2 (k_E) oziroma kot WP-3 (k_E). Začetna velikost razpoke je $a_0 = 34,5$ mm, končna pa $a_0 + 3$ mm = 37,5 mm.

3.2 Vedenje WP-preizkušanca med širjenjem razpoke

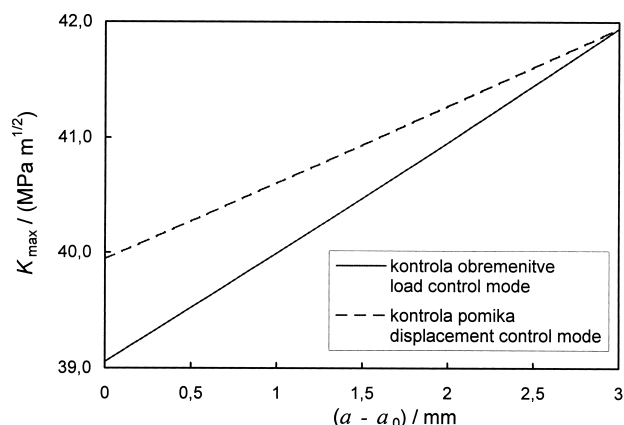
Predpostavimo, da središčna razpoka na WP-preizkušancu že obstaja. Njena velikost je $a_0 = 34,5$ mm, kar je 3 mm manj od predvidene končne velikosti razpoke $a = 37,5$ mm. Samo širjenje razpoke ne sme vplivati na vrednost lomne žilavosti, zato je treba ciklično obremenitev nastaviti tako, da K_{max} pri dokončanju razpoke ustreza dopustni obremenitvi F_{max} v enačbi 4.



Slika 7: Največja nominalna napetost σ_{\max} v odvisnosti velikost razpoke $a - a_0$ pri obremenitvi WP-preizkušanca s središčno razpoko pri kontroli obremenitve in pomika

Figure 7: Maximum nominal stress σ_{\max} versus the crack size $a - a_0$ when a WP-specimen with a center crack is loaded in the load-control mode and in the displacement-control mode

Glede na razpoložljive vrste pulzatorjev lahko obremenitev WP-preizkušanev izvedemo ali pri kontroli obremenitve ali pa pri kontroli pomika. Pri kontroli sile je vsak obremenilni cikel enak, ne glede na odziv preizkušanca. Pri kontroli pomika pa je ves čas enak cikel raztezanja preizkušanca (pomik prijemašča obremenitve). Na **sliki 7** je prikazana odvisnost napetosti σ_{\max} od velikosti razpoke $a - a_0$ pri obremenjevanju WP-preizkušanca s središčno razpoko pri kontroli obremenitve oziroma pomika. Obremenitev je izvedena tako, da je pri $a = 37,5$ mm ($\alpha = 0,5$) $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{dop}} = 103$ MPa. Pri kontroli pomika izdelavo razpoke dejansko začnemo pri višji nominalni napetosti. Na **sliki 8** je prikazan potek obeh ustreznih vrednosti faktorja inenzitete napetosti, ki pri $a = 37,5$ mm ($\alpha = 0,5$) ravno dosežeta dovoljeno velikost $K_{\max} = 41,95$ MPa $\sqrt{\text{m}}$. Za-



Slika 8: Največja vrednost faktorja intenzitete napetosti K_{\max} v odvisnosti od velikosti razpoke $a - a_0$ pri obremenitvi WP-preizkušanca s središčno razpoko pri kontroli obremenitve in pomika

Figure 8: Maximum nominal stress K_{\max} versus the crack size $a - a_0$ when a WP specimen with a center crack is loaded in the load-control mode and in the displacement-control mode

radi večanja ΔK se razpoka v obeh primerih širi vse hitreje (enačba 2).

4 RAZPRAVA

Med utrujanjem WP-preizkušanca s središčno razpoko, ko se razpoka širi v skladu z enačbo 2, se njegova togost zmanjšuje (**slika 6**).

4.1 Kontrola obremenitve

Utrujenostna razpoka se širi pri konstantnem razponu obremenitve oziroma nominalne napetosti (**slika 7**). Naraščajoči vrednosti a in α v enačbi 1 sta na **sliki 8** vzrok za naraščanje K_{\max} in razpona faktorja intenzivnosti napetosti ΔK . Zato po pričakovanju raste tudi hitrost širjenja razpoke. Na začetku izdelave razpoke, ko je ta šele 34,5 mm (a_0), je ΔK manjši, kot na koncu, ko je $a = 37,5$ mm (enačba 1). Zato se utrujenostna razpoka sprva širi bistveno počasneje. Ker je soodvisnost obeh veličin v enačbi 2 eksponentna (m je velikostnega reda 3), raste v da/dN trikrat hitreje kot ΔK . Zato se razpoka v začetku širi približno trikrat počasneje kot v zaključni fazi izdelave razpoke. Zaradi tega je nadzor širjenja takšne razpoke nekoliko otežen iz dveh razlogov:

- Zaradi začetne majhne hitrost širjenja razpoke, lahko nastajanje razpoke traja več ur. Tu igra pomembno vlogo pogostost obremenjevanja, ki pa je odvisna od zmogljivosti pulzatorja. Budnost operaterja se lahko zaradi majhne hitrosti širjenja razpoke sčasoma zmanjša. Vendar pa razpoka, ki se širi, raste vse hitreje. Zlahka se zgodi, da je utrujanje prekinjeno šele takrat, ko je razpoka že prevelika.
- Za pospešitev širjenja razpoke na začetku izdelave lahko operater začne utrujanje na višji ravni. Predvideva jo znižati na predpisano raven takoj, ko bo razpoka nekoliko večja. Vendar pa se razpoka pri večji obremenitvi širi bistveno hitreje. To je lahko vzrok, da je razpoka prevelika že ob prekinitvi utrujanja. Poleg tega pa je takšna razpoka narejena pri previsoki obremenitvi, ki zanesljivo vpliva na vrednost eksperimentalno določene lomne žilavosti.

4.2 Kontrola pomika

Utrujenostna razpoka se širi pri konstantnem ciklu raztezanja plošče. Obremenitveni cikel je dejansko posledica trenutne togosti WP-preizkušanca. Ker se togost zmanjšuje, ko se razpoka širi (**slika 6**), se zmanjšuje tudi razpon obremenitve ΔF . Pričakovati je bilo, da se bosta zaradi tega zmanjšala tako razpon faktorja intenzitete napetosti ΔK kot hitrost širjenja razpoke da/dN . Razpoka naj bi se zato širila vse počasneje, kar bi nadzor nastajanja razpoke olajšalo. Toda to pričakovanje ni bilo upravičeno. Pri plošči s središčno razpoko je prispevek tistega dela v enačbi 1, ki je odvisen od a in α , večji od prispevka zaradi manjše

nominalne napetosti. Hitrost širjenja razpoke pri kontroli pomika se dejansko povečuje, vendar nekoliko počasneje kot pri kontroli obremenitve. Zmožnost nadziranja širjenja razpoke pri utrujanju WP-preizkušanca zaradi tega sicer ni bistveno večje, manjša hitrost širjenja razpoke pa pride kar prav.

5 SKLEP

Togost WP-preizkušanca s središčno razpoko se med utrujanjem, ko se razpoka širi, zmanjšuje. Če je ciklična obremenitev izvedena pri kontroli obremenitve, se razpon intenzitete napetosti in hitrost širjenja razpoke povečujeta tako kot pri standardnih CT- in SENB-preizkušancih. Nadzor širjenja razpoke pri kontroli obremenitve ni posebno lahek. Če je WP-preizkušanec ciklično obremenjen pri kontroli pomika, se razpon obremenitve med širjenjem razpoke zmanjšuje tako kot pri standardnih CT- in SENB-preizkušancih. Kljub temu pa se razpon intenzitete napetosti in hitrost širjenja razpoke, nasprotno od obeh standardiziranih preizkušancev, povečujeta. Toda za prakso je kar koristno, da se hitrost širjenja razpoke pri kontroli pomika povečuje za

tretjino počasneje kot pri kontroli obremenitve. Nadzor širjenja razpoke je tako lažji. Zavedati se je treba, da je cena izdelave WP-preizkušancev bistveno večja od cene izdelave standardiziranih majhnih lomno-žilavostnih preizkušancev. Priprava razpoke je zadnja faza pri izdelavi preizkušancev za eksperimentalno določitev lomne žilavosti zvara, zato je neuspeh hud udarec, strokoven in finančen.

6 LITERATURA

- ¹ D. Rojko: Določitev lomne žilavosti na velikih preizkušancih in primerjava lomne žilavosti na standardnih preizkušancih, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Master's Degree (in Slovene), Maribor, 2000
- ² Y. Murakami: Stress Intensity Factors Handbook, Volume 1, Pergamon Press, 1987
- ³ H. Liebowitz: Fracture II, Mathematical Fundamentals, Academic Press, 1968
- ⁴ BS 7448-1: Fracture Mechanics Toughness Test, Part 1. Method for Determination of K_{Ic} , Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials, 1991
- ⁵ E 399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1990