

THE INFLUENCE OF SPECIMEN GEOMETRY ON PLASTICITY INDUCED CRACK CLOSURE

L. Náhlík^{*}, P. Hutař^{*}

Summary: *The paper investigates the effect of in-plane constraint on plasticity induced crack closure under conditions of small scale yielding. The growth of a sharp straight crack in middle tension specimen (MT) and compact tension (CT) specimen, under constant amplitude of cyclic loading, was analyzed with help of finite element method. The material constitutive behavior was represented by a purely kinematic hardening law. Obtained results are discussed from point of view of the influence of T-stress on plasticity induced crack closure. Significant difference between opening values for CT and MT specimens was found under conditions of plane strain.*

1. Úvod

Koncept zavírání trhliny v oblasti vysokocyklové únavy byl představen poprvé v sedmdesátých letech Elberem (1970) na základě experimentálních výsledků získaných při měření rychlosti šíření únavové trhliny v hliníkové slitině. Existence zavírání trhliny byla tehdy odvozena z nelineární závislosti zatížení versus otevření trhliny. Od té doby se touto problematikou zabývá mnoho autorů např. Skinner (2001), Solanki a kol.(2004), Roychowdhury a kol.(2004), Vasudeven a kol.(1994). Zavírání trhliny představuje v podstatě kontakt liců trhliny během cyklického zatěžování. Lze ukázat, že k tomuto kontaktu dojde v mnoha případech dříve než odpovídá nulovému vnějšímu zatížení. To může být způsobeno nepravidelným tvarem lomové plochy, částicemi které se mezi lomové plochy dostanou během cyklického zatěžování nebo vlivem reverzní plastické zóny. Z fyzikálního pohledu se dá říci, že pokud dojde ke kontaktu lomových ploch, nemůže docházet k dalšímu šíření trhliny. V tomto smyslu lze brát tu část zatěžovacího cyklu, ve které je trhlina zavřená, jako nepoškozující.

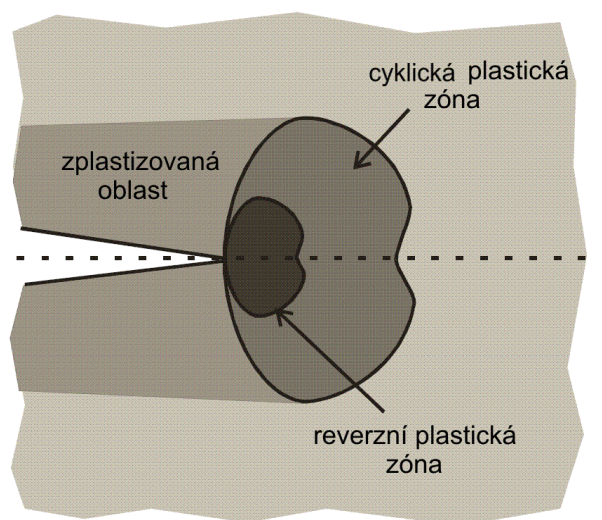
Cílem příspěvku je ukázat vliv geometrie tělesa (constraintu) a různých úrovní zatěžování na plasticky indukované zavírání trhliny. Na tělese s centrální trhlinou (MT) a na tělese zatěženém excentrickým tahem (CT) je testována závislost otevření trhliny pro různou hladinu constraintu. MT zkušební těleso je charakterizováno zápornou hodnotou T-napětí (nízký constraint), zatímco CT těleso lze popsat kladnou hodnotou T-napětí (vysoká hladina constraintu). Na těchto zkušebních tělesech byly provedeny testy vlivu constraintu na rychlost šíření únavové trhliny (Hutař a kol., 2004). Ukázalo se, že v oblasti prahových hodnot a pro nízké rychlosti šíření, záporné T-napětí urychluje růst únavové trhliny (Hutař a kol., 2004),

^{*} Ing. Luboš Náhlík, PhD., Ing. Pavel Hutař, PhD., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd ČR; Žižkova 22; 616 62 Brno; tel.: +420.532 290 351, fax: +420.541 218 657; e-mail: nahlik@ipm.cz hutar@ipm.cz

zatímco pro vysoké rychlosti šíření únavové trhliny záporné T-napětí naopak zpomaluje růst únavové trhliny (Tong, 2002). Tyto jevy by bylo možno vysvětlit vlivem T-napětí na plasticky indukované zavírání trhliny, který roste s rostoucím zatížením.

2. Zavírání únavové trhliny

V práci se budeme zabývat zejména případem plasticky indukovaného zavírání trhliny. Schematicky je situace před čelem trhliny během cyklického zatěžování s konstantní amplitudou naznačena na obr.1.



Obr.1 Plastizace před čelem trhliny během cyklického zatěžování

Během zatěžovací části cyklu se tvoří cyklická plastická zóna jejíž velikost je úměrná aplikovanému zatížení. Při odlehčení se vlivem tlakových napětí začne tvořit reverzní plastická zóna, která je příčinou zavírání trhliny. Její velikost odpovídá asi jedné čtvrtině velikosti cyklické plastické zóny. S rostoucí velikostí reverzní plastické zóny roste i vliv zavírání na šíření únavové trhliny. V klasické lineární elastické lomové mechanice (LELM) se rychlost šíření trhliny v oblasti vysokocyklové únavy stanovuje pomocí Parisova-Erdoganova zákona (např. Klesnil a kol., 1992):

$$da/dN = C(\Delta K_I)^m, \quad (1)$$

kde ΔK_I je amplituda faktoru intenzity napětí a C a m jsou materiálové konstanty. Parisův vztah lze modifikovat se zahrnutím vlivu zavírání trhliny do následujícího tvaru (Anderson, 1992):

$$da/dN = C(K_{eff})^m. \quad (2)$$

K_{eff} je efektivní hodnota faktoru intenzity napětí, která se vypočte jako rozdíl mezi skutečnou hodnotou faktoru intenzity napětí K_I a faktorem intenzity napětí odpovídajícím otevření trhliny K_{op} .

$$K_{eff} = (K_I - K_{op}) \quad (3)$$

Výsledná hodnota K_{eff} je tedy snížena o tu část zatěžovacího cyklu, kdy je trhlina zavřená. Okamžik otevření trhliny se v literatuře definuje různě. Definice vycházející

z experimentálního měření definuje otvírání (zavírání) trhliny jako konec (počátek) nelineární závislosti zatížení versus otevření trhliny (Elber, 1970). Ve výpočtových studiích je často otvírání definováno jako ztráta kontaktu mezi lomovými plochami (např. Skinner, 2001; Solanki a kol., 2004). Stejně je definováno otvírání (zavírání) únavové trhliny i v této práci.

3. Výpočtový model

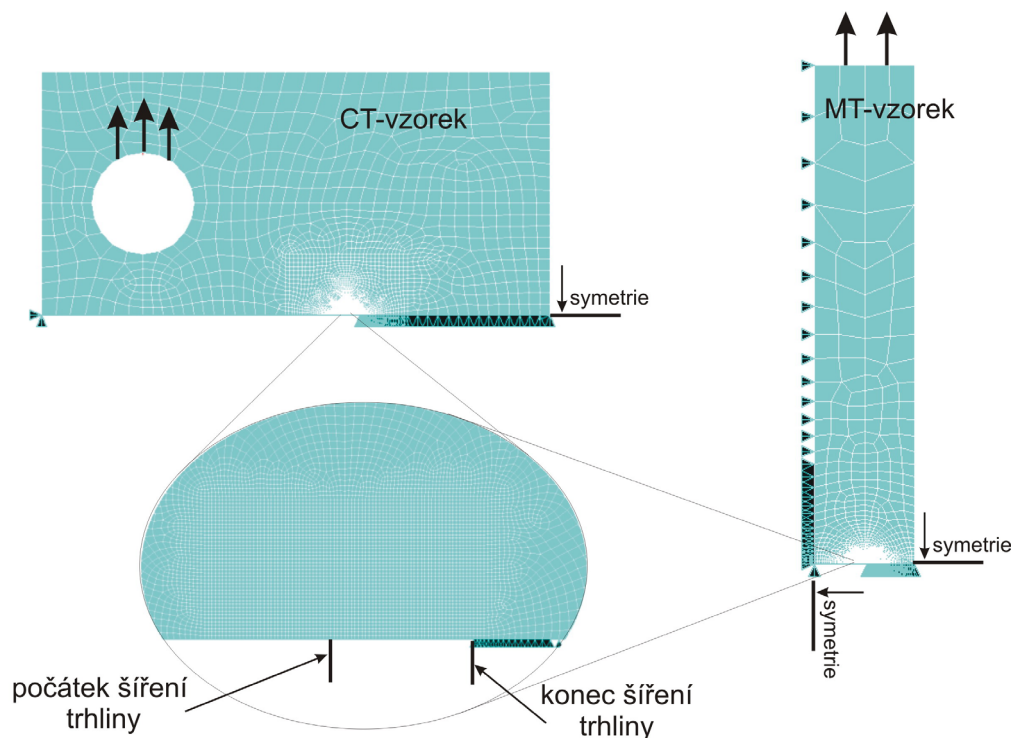
Příslušné výpočty byly provedeny na modelech dvou zkušebních vzorků: na vzorku s centrální trhlinou (MT) a vzorku namáhaném excentrickým tahem (CT). Rozměry odpovídají standardním vzorkům používaným k měření rychlosti šíření únavové trhliny na pracovišti ÚFM. Poměr délky trhliny k šířce vzorku byl zvolen $a/W = 0.5$. Modely vytvořené pomocí výpočtového systému konečných prvků ANSYS jsou zobrazeny na obr.2. MT vzorek je modelován ve čtvrtinové symetrii. CT vzorek byl modelován v poloviční symetrii. Modely vytvořené s podmínkou rovinné deformace obsahovaly typicky cca 7000 8-uzlových izoparametrických elementů (PLANE 182). V okolí kořene trhliny byla síť nejkvalitnější, velikost prvků zde odpovídala relaci doporučené v literatuře (Skinner, 2001; Solanki a kol., 2004):

$$x \approx 0.1r_p = \frac{1}{10\alpha\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_o} \right), \quad (4)$$

kde α je rovno 1 za podmínky rovinné napjatosti a 3 za podmínky rovinné deformace. σ_o je mez kluzu daného materiálu a r_p velikost plastické zóny před čelem trhliny.

Výpočtové modely obou vzorků mají rovinu symetrie v rovině trhliny a proto je kontakt líců trhliny zajištěn pomocí jednostranné okrajové podmínky. V konečnoprvkovém systému ANSYS je tato podmínka realizována jako kontakt mezi lícem trhliny a absolutně tuhým tělesem. Na líci trhliny byly použity osmiuzlové kontaktní prvky CONTACT 172 v kontaktu s tuhým tělesem definovaným pomocí kontaktních prvků TARGET 169. Protože pozorované zavírání trhliny při koeficientu asymetrie $R=0$ je poměrně malé je třeba při výpočtu zvolit malou penetraci kontaktních ploch k dosažení věrohodných výsledků.

Zatěžování odpovídalo dříve provedeným experimentům, které byly dělány za účelem zjištění vlivu geometrie tělesa na rychlost šíření únavové trhliny (Hutař a kol., 2004). Pro zatěžování byl použit míjivý cyklus a řízenou veličinou byla zatěžující síla, která se během jednoho cyklu nabývala hodnot v intervalu od 0 do F_{\max} . Při výpočtu bylo aplikováno na modely uvedené na obr.2 bylo 7 zátěžných cyklů. V každém cyklu byla zjišťována hodnota vnějšího zatížení, při kterém se trhlina zavře a hodnota vnějšího zatížení, při kterém se trhlina otevře. Při dosažení maximálního zatížení došlo každý cyklus k nárůstu trhliny typicky o 4elementy (cca 0,05 mm).

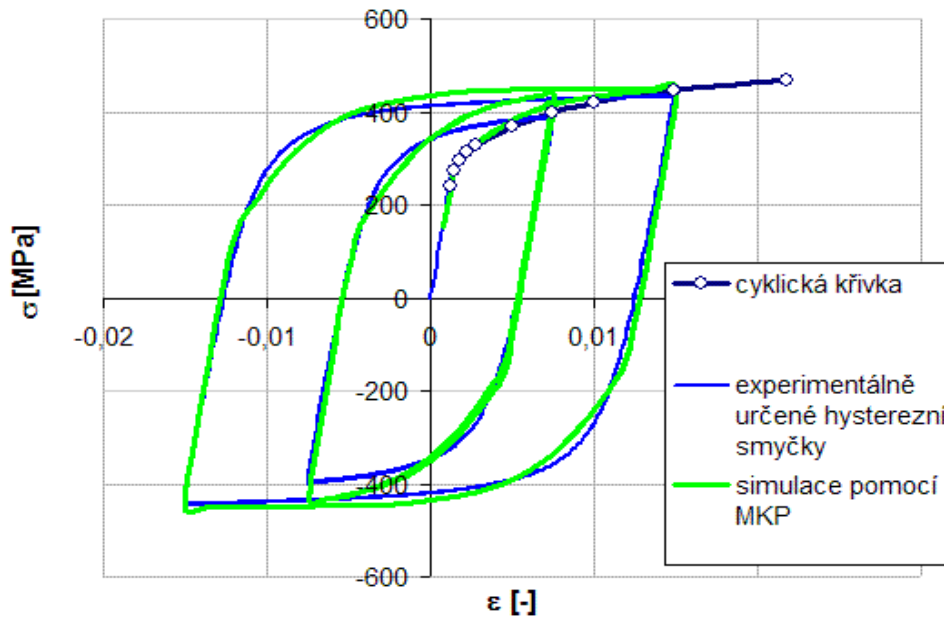


Obr.2 Modely použité při výpočtu plastického zavírání trhliny

Materiálový model odpovídal oceli 15 418 s chemickým složením: 0,04%C, 2,3%Cr, 0,8Mn, která byla použita k experimentům v práci (Hutař a kol., 2004). Elastická oblast křivky napětí-deformace byla charakterizována modulem pružnosti $E = 205\text{GPa}$ a Poissonovým číslem je $\nu = 0.3$. Plastická část křivky byla popsána pomocí Chabocheova modelu s kinematickým zpevněním (Lemaitre a Chaboche, 1987). Nelineární část křivky napětí-deformace byla potom popsána vztahem:

$$dX = C \left(\frac{2}{3} A d\varepsilon_p - X dp \right), \quad (5)$$

kde C a A jsou parametry Chabocheova modelu, ε_p je tenzor plastického přetvoření a X je kinematická část tenzoru napětí S . Vztah (5) je možno použít jestliže platí rovnost $J_2 = (S - X) = R_o$. V ostatních případech je chování materiálu čistě elastické. R_o odpovídá mezi kluzu materiálu a definuje přechod mezi lineární a nelineární částí funkce napětí versus deformace. Pro zkoumanou ocel byly stanoveny materiálové parametry následovně: $R_o = 280\text{MPa}$, $A = 170\text{MPa}$, $C = 300$. Porovnání mezi naměřenými hysterezními smyčkami a numerickou simulací provedenou za pomoci Chabocheova modelu s kinematickým zpevněním je vidět na obr.3.



Obr.3 Porovnání hysteresezích smyček zjištěných experimentálně na oceli 15 418 a numerické simulace provedené pomocí MKP na modelu jednoduchého tahového vzorku.

4. Výsledky numerických simulací

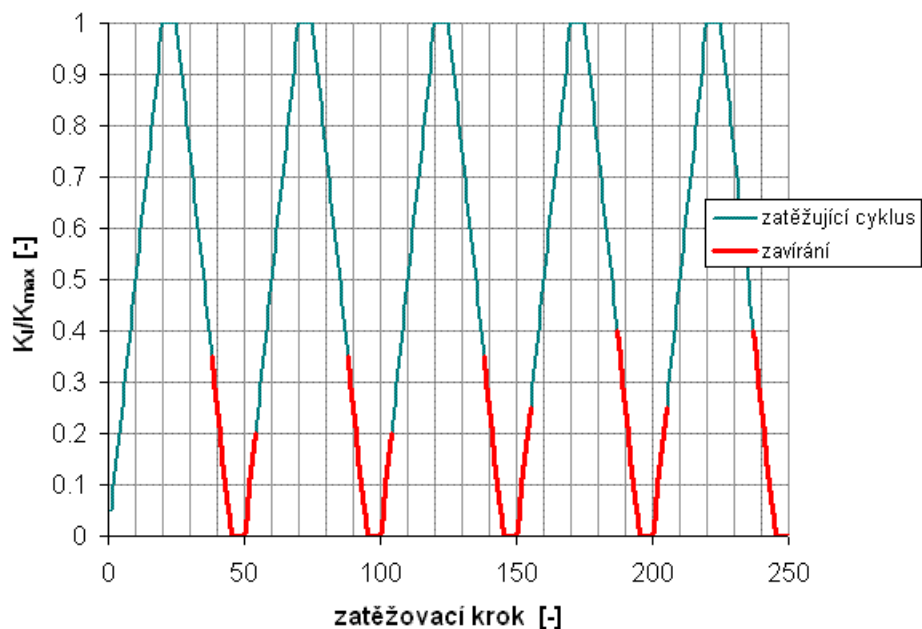
Modely popsané v předchozí kapitole byly cyklicky zatěžovány s rozdílnou amplitudou zatěžující síly odpovídající faktoru intenzity napětí $K_{\max} = 11; 22; 33; 44 \text{ MPa m}^{1/2}$. Z nezatíženého stavu na maximální hodnotu zatěžovací síly bylo použito 20 po sobě jdoucích zátěžných kroků. V bodě maximální hodnoty zatěžování byla trhlina prodloužena o konstantní hodnotu Δa (0,05 mm). Výsledkem každé simulace byl okamžik zavírání a otvírání trhliny odpovídající každému zatěžujícímu cyklu, viz.obr.4.

Z obr. 4 je patrné, že otvírání ani zavírání trhliny se příliš během cyklování nemění. V prvním cyklu se trhlina zavírá asi při 35% a otevírání přibližně při 20% hodnoty zatížení. Pro třetí a čtvrtý cyklus se zavírací a otevírací napětí zvýší asi o pět procent. Tato hodnota se již nemění ani při aplikaci více cyklů a lze tuto hodnotu považovat za zavírání (otvírání) odpovídající cyklickému zatěžování. Relevantní hodnoty zavírání a otvírání dostaneme až je celkový přírůstek trhliny větší než velikost monotónní plastické zóny, což v tomto případě odpovídá asi třem cyklům.

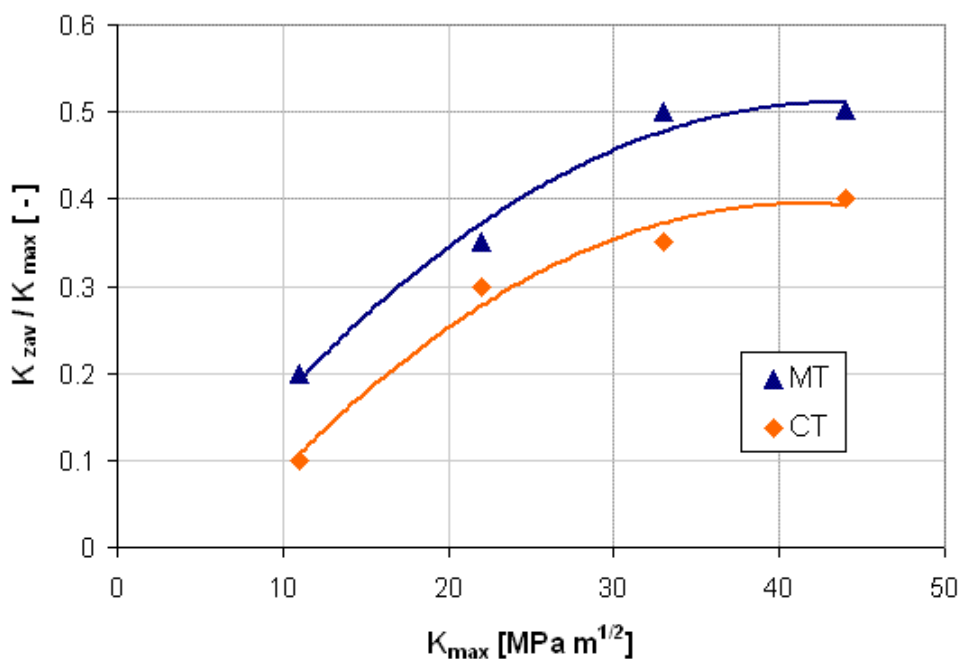
Zavírání trhliny bylo definováno jako kontakt lomových ploch. K jeho vyhodnocení byly využity dvě metody. Monitorování posuvů na lících trhliny a zároveň monitorování přímo kontaktních prvků a následné vyhodnocení kontaktu. Obě metody vedou ke shodným výsledkům jenž jsou zobrazeny v grafu na obr.4.

Obr.5 ilustruje závislost zavírání trhliny na zatížení pro CT a MT těleso. S rostoucím zatížením (s rostoucí hodnotou faktoru intenzity napětí) dosahuje zavírání vyšších hodnot. Pro faktor intenzity napětí $K_{\max} = 11 \text{ MPa m}^{1/2}$, se trhlina zavře u CT zkušební tělesa při 10% zatížení. U MT tělesa při 20% zatížení. Pro $K_{\max} = 44 \text{ MPa m}^{1/2}$ se trhlina zavírá již při 40% zatížení u CT tělesa a při 50% zatížení u MT tělesa. Těleso s centrální trhlinou tedy

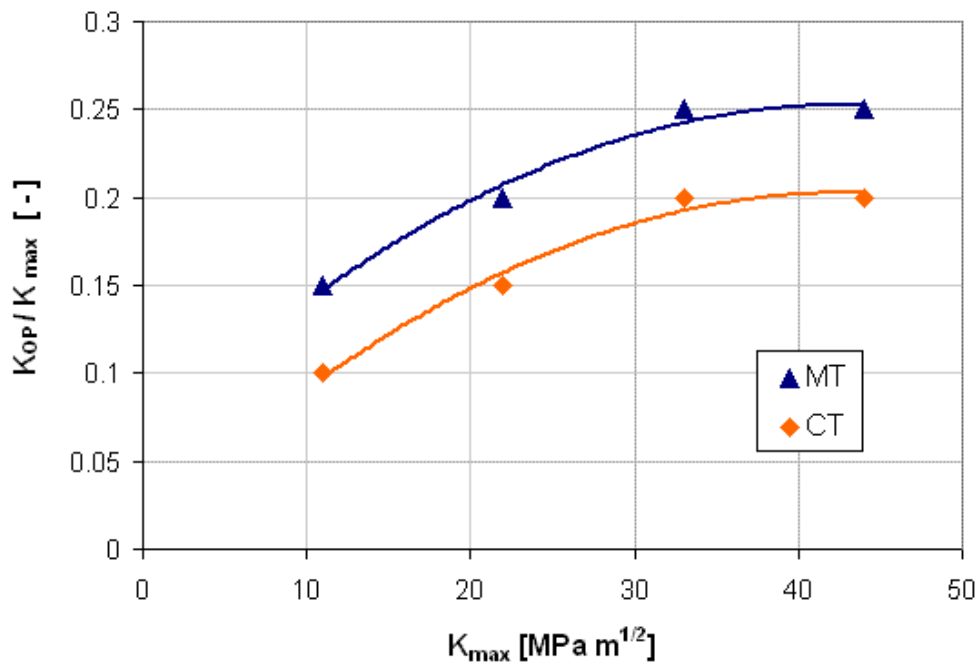
systematicky dosahuje vyšších hodnot napětí, při kterých dojde k zavírání trhliny než CT těleso. To je způsobeno tím, že MT vzorek má při stejné hodnotě faktoru intenzity napětí větší plastickou zónu než je při stejné úrovni zatížení u CT vzorku. Plasticky indukované zavírání trhliny je tedy výraznější.



Obr.4 Zatěžující cyklus s vyznačenou oblastí, ve které je trhlina zavřena. Výpočet byl proveden pro konstantní hodnotu $K_{max} = 22 \text{ MPa m}^{1/2}$



Obr.5 Zavírání trhliny v závislosti na maximální hodnotě faktoru intenzity napětí pro CT a MT zkušební tělesa.



Obr.6 Otevírání trhliny v závislosti na maximální hodnotě faktoru intenzity napětí pro CT a MT zkušební tělesa.

Podobné závěry platí také pro otevírání trhliny (viz obr.6). S rostoucím zatěžováním roste napětí, při kterém dojde k otevření trhliny. Například u CT tělesa dojde k otevření při 10% zatížení při $K_{max} = 11 \text{ MPa m}^{1/2}$. Pro $K_{max} = 44 \text{ MPa m}^{1/2}$ je to již při 20% aplikovaného zatížení.

Rozdíl mezi CT a MT tělesem v hodnotě otevíracího faktoru intenzity napětí je zhruba konstantní a odpovídá cca 10%. Lze konstatovat, že záporné T-napětí (geometrie s nízkou hladinou constraintu) zvětšuje nejen velikost plastické zóny v okolí kořene trhliny, ale zároveň zvětšuje i hodnotu otevíracího napětí. Použijeme-li modifikovaný Parisův-Erdoganův vztah (2) k odhadu rychlosti šíření trhliny zjistíme, že v MT tělese dojde k retardaci rychlosti šíření trhliny vlivem existence constraintu. Tato skutečnost odpovídá experimentálním výsledkům uvedeným v práci (Tong, 2002).

5. Závěr

V příspěvku je diskutován vliv constraintu na plasticky indukované zavírání trhliny. Je ukázáno, že geometrie se zápornou hodnotou T-napětí (např. zkušební těleso s centrální trhlinou) mají větší hodnotu otevíracího faktoru intenzity napětí než geometrie s kladnou hodnotou T-napětí. To je zapříčiněno tím, že tělesa se zápornou hodnotou T-napětí mají větší cyklickou a reverzní plastickou zónu než tělesa s kladnou hodnotou T-napětí. Díky větší plastické zóně dochází u MT tělesa k dřívějšímu zavírání trhliny a jejímu pozdějšímu otevírání. Proto v oblasti, kde plasticky indukované zavírání trhliny ovlivňuje rychlost šíření trhliny bude těleso s centrální trhlinou vykazovat nižší rychlosti šíření než CT vzorek.

Zároveň lze konstatovat, že otevírání trhliny je silně závislé na aplikovaném zatížení a s rostoucím zatížením se zvětšuje část cyklu, která je nepoškozující. Při tomto jevu dochází

ke zmenšení rychlosti šíření únavové trhliny vzhledem k rychlosti vypočtené podle Parisova vztahu. Skutečná rychlost šíření trhliny může tedy být přístupy LELM značně nadhodnocena.

Pro spolehlivý odhad životnosti konstrukcí je tedy třeba vzít do úvahy jak velikost T-napětí, tak i vliv plasticky indukovaného zavírání trhliny. To platí zejména pro oblast zatěžování kde je zavírání trhliny nejvýznamnější, tj. pro střední a vyšší rychlosti šíření únavové trhliny.

6. Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za podpory grantů Grantové agentury ČR č.106/06/P239 a č.106/04/P084.

7. Literatura

Anderson, T.L. (1995) Fracture mechanics-Fundamentals and Applications, *CRC Press Inc.*

Elber, W. (1970) Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engng. Fracture Mechanics*, 2, pp.37-45.

Hutař, P., Seitzl, S., Knésl, Z. (2004) Quantification of the effect of specimen geometry on the fatigue crack growth response by two-parameter fracture mechanics. *Mater. Sci. Engng. A*, 387-389. pp.491-494.

Klesnil, M., Lukáš, P. (1992) Fatigue of metallic materials, *Elsevier*, Amsterdam.

Lemaitre J., Chaboche J.L. (1987) Mechanics of Solid Materials. *Springer-Verlag*.

Roychowdhury, S., Dodds, R.H. (2004) Effect of T-stress on fatigue crack closure in 3-D small scale yielding. *Inter. Journal of Solides nad Struct.*, 41, pp. 2581-2606.

Skinner, J.D. (2001) Finite element predictions of plasticity-induced fatigue crack closure in three-dimensional cracked geometrie, *MSC thesis*, Mississippi State University.

Solanki, K., Daniewicz, S.R., Newman, J.C. (2004) Finite element analysis of plasticity-induced fatigue crack closure: an overview. *Engng. Fracture Mechanics*, 71. pp.149-171.

Tong, J. (2002) T-stress and its implications for crack growth. *Engng. Fracture Mechanics*, 69, pp.1325-37.

Vasudeven, A.K., Sadananda K., Louat N.(1994) A review of crack closure, fatigue crack threshold and related phenomena. *Mater. Science and Engng. A*, 188. pp.1-22.