

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles

**Ing. Stanislav Seitl**

**DVOUPARAMETROVÁ LOMOVÁ MECHANIKA**  
**Popis krátkých únavových trhlin**

TWO-PARAMETER FRACTURE MECHANICS  
Description of Short Fatigue Cracks

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

**Obor:** Inženýrská mechanika

**Školitel:** Prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.

**Oponenti:** Ing. Karel Bednář, Ph.D.  
Prof. Ing. Otakar Bokůvka, CSc.  
Ing. Vladislav Kozák, CSc.

**Datum obhajoby:** 23. 10. 2003

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

dvouparametrová lomová mechanika, krátká únavová trhлина, numerické metody, constraint, T-napětí, Q-parametr, rychlost šíření, směr šíření

## **KEY WORDS**

Two-parameter Fracture Mechanics, Short Fatigue Crack, Numerical Methods, Constraint, T-stress, Q-parameter, Propagation Rate, Propagation Direction

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:**

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu

VUT FSI Brno

Technická 2

616 69

© Stanislav Seitl, 2003

ISBN 80-214-2579-2

ISSN 1213-4198

## OBSAH:

1	ABSTRACT .....	4
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	5
2.1	Úvod.....	5
2.2	Hodnocení publikovaných prací s ohledem na studovanou problematiku .....	5
2.3	Dvoupřímá lomová mechanika .....	6
2.4	Rychlost šíření únavových trhlin.....	7
2.5	Problematika krátkých únavových trhlin .....	8
3	CÍL PRÁCE .....	9
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	10
4.1	Fenomenologický popis šíření únavové trhliny .....	10
4.2	Metodika výpočtu lomově mechanických parametrů .....	12
5	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....	13
5.1	Dlouhé únavové trhliny .....	13
5.2	Krátké trhliny .....	14
5.2.1	<i>Modelování krátkých trhlin.....</i>	<i>14</i>
5.2.2	<i>Numerické výsledky.....</i>	<i>16</i>
6	ZÁVĚR.....	26
6.1	Oblast dlouhých únavových trhlin .....	26
6.2	Modelování krátkých únavových trhlin a metody výpočtu lomově-mechanických parametrů .....	27
6.3	Získané numerické výsledky .....	27
7	SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	28
8	VÝTAH Z POUŽITÉ LITERATURY .....	29
9	SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU.....	30
10	AUTOROVO CURRICULUM VITAE.....	32

# 1 ABSTRACT

The object of this work was to investigate and expand on previously carried out research concerning the influence of the degree of crack tip stress field constraint on short fatigue crack region. To this aim a constraint based two-parameter fracture mechanics was employed. As a precursor to this research relevant basic concepts of fracture mechanics are introduced along with the problem. The results of the study are concerned with three parts of the investigated problem:

The first part was devoted to the effect of constraint on the propagation of the fatigue crack propagation under high cycle conditions. The different values of constraint are characterized in terms of the T-stress value. Experimental data, obtained on different types of test specimens, were compiled using numerical method with endeavour to eliminate the influence of T-stress on the fatigue crack propagation rate. Further, the influence of the T-stress on the fatigue crack propagation direction under mixed mode loading condition is discussed and the parameter that determines the location where the criterion should be applied is fixed. Application ability of two-parameter description of crack growth was studied in case of fatigue crack growth in threshold region.

The short cracks were modelled in the second part of the study. A micro-structurally short crack in the vicinity of a nonhomogeneity is studied with in the framework of linear elastic fracture mechanics. The values of stress intensity factor  $K_I$  and  $K_{II}$  corresponding to normal and shear mode of loading and the value of T-stress (or parameter biaxiality B) are calculated for a generally oriented crack approaching the interface. The crack, which is engulfed by the plastic strain field of a notch, is studied as example of mechanically short crack. The corresponding calculations are performed by using a finite element method (ANSYS system)). It is shown that for proper orientation of a short crack the values of the T-stress (or the Q-parameter) decrease with decreasing crack length and become more negative for short cracks.

The last part was focused on discussion about the possibility of application two-parameter fracture mechanics for description of the above short cracks and discussion about reached results. Generally, the nominal values of the fracture parameters are not adequate to describe the behaviour of short fatigue cracks. The short crack problem is essentially an outcome of the inapplicability of the fracture mechanics parameters and approaches to characterize uniquely the growth of fatigue cracks independent of the crack size.

The existence of negative values of the T-stress (or the Q-parameter) influences plastic zone size and crack opening displacement. The loss of the constraint accelerated growth of short fatigue cracks. The fatigue crack propagation rate of properly oriented cracks is greater than for longer cracks.

The presented results contribute to explanation of the anomalous behaviour of short fatigue cracks.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 ÚVOD

Snaha o objasnění zákonitostí porušování těles a vzniku lomu v materiálech o vysoké pevnosti vedla k vytvoření vědní disciplíny – mechaniky lomu. V první fázi byla rozvinuta klasická (jednoparametrová) lomová mechanika, která vychází z předpokladu, že pole napětí a deformace v okolí kořene trhliny a tím i počátek lomu jsou charakterizovány jediným parametrem. V případě lineární elastické lomové mechaniky (LELM), kdy předpokládáme, že rozsah plastických deformací v okolí kořene trhliny je zanedbatelný ve srovnání s délkou trhliny a charakteristickými rozměry tělesa, je takovým parametrem obvykle hodnota součinitele intenzity napětí  $K$ , nebo hnací síla trhliny  $G$  [9]. Je-li rozsah plastických deformací větší a nelze-li jejich vliv na lomové chování tělesa zanedbat, tj. v případě elasto-plastické lomové mechaniky (EPLM), může být takovým parametrem hodnota Riceova  $J$ -integrálu [13], nebo otevření na čele trhliny  $CTOD$ . Základním tvrzením takto koncipované lomové mechaniky je pak předpoklad, podle něhož kritické hodnoty těchto parametrů,  $K_C$ ,  $G_C$ ,  $J_C$ , respektive  $CTOD_C$  jsou materiálové konstanty nezávislé na geometrii tělesa. Tato hypotéza umožňuje měření těchto kritických lomové mechanických parametrů pomocí zkušebních těles v laboratoři a je klíčová při aplikaci lomové mechaniky na stanovení podmínek lomu pro reálná tělesa v technické praxi.

Řada výsledků uvedených v literatuře ukazuje, že chování trhliny charakterizované danou hodnotou  $K$ , respektive  $G$  (v lineární elastické lomové mechanice), případně hodnotou  $J$ , respektive  $CTOD$  (v oblasti elasto-plastické lomové mechaniky) není vždy identické a může záviset i na různém stupni multiaxiality napětí v okolí kořene trhliny vyvolaném různou geometrií studovaných těles. Tato skutečnost vyvolává pochybnosti o možnosti přenosu kritických veličin lomové mechaniky  $K_{IC}$ ,  $G_{IC}$ ,  $J_{IC}$ , respektive  $CTOD_{IC}$  naměřených na malých laboratorních vzorcích na reálné konstrukce a jejich využití pro stanovení kritického stavu konstrukce. Vliv multiaxiality napětí na čele trhliny na lomové chování je v této souvislosti označován jako constraint efekt. Poznamenejme, že pro constraint zatím neexistuje český ustálený ekvivalent a proto nebudeme v dalším textu tento termín překládat.

Dvoupametrová lineární elastická lomová mechanika představuje zobecnění klasického, jednoparametrového přístupu a umožňuje popis vlivu multiaxiality napětí na čele trhliny tím, že používá pro hodnocení napětí v okolí vrcholu trhliny kromě singulárního členu Williamsova rozvoje i další, konstantní člen, tzv.  $T$ -napětí (případně v rámci elasto-plastické lomové mechanice  $Q$ -parametr) V tomto přístupu je tedy pole napětí a deformací, a tím i lomové chování trhliny charakterizováno dvěma parametry ( $K$ - $T$ , nebo  $J$ - $Q$ ).

### 2.2 HODNOCENÍ PUBLIKOVANÝCH PRACÍ S OHLEDEM NA STUDOVANOU PROBLEMATIKU

Publikované práce v oblasti výzkumu chování trhlin lze rozdělit do čtyř základních skupin. Do skupiny prací ubírajících se cestou analytického popisu chování trhlin v oblasti koncentrace napětí např. [18], dále následují práce zaměřené na nalezení kritérií stability šíření trhliny např. [5], třetí skupinu tvoří práce zaměřující se na numerické modelování chování trhlin a jejich okolí pomocí metody konečných prvků (MKP) např. [6] a čtvrtou

skupinu tvoří práce zabývající se aplikací dvouparametrového popisu na dlouhé únavové trhliny [8]. Po studiu těchto prací (detailnější rozbor publikací je možno nalézt v Pojednání ke Státní doktorské zkoušce [14], které předcházelo předkládané disertační práci) lze říci, že v oblasti analytického popisu rozložení napětí v okolí trhliny v rámci dvouparametrové lomové mechaniky poskytují publikované práce dostatek informací a lze s jejich pomocí přistoupit ke krokům následujícím. V oblasti druhého kroku, tedy v oblasti šíření trhliny je v rámci dvouparametrové lomové mechaniky publikováno málo prací většinou se zabývající dvouparametrovým popisem šířením trhliny pouze okrajově. V oblasti numerických výpočtů a numerického modelování chování trhlín existuje několik prací, ty však většinou využívají speciální trhlinové případně hybridní prvky, které nelze obecně použít se standardními numerickými systémy. Z toho důvodu se v rámci studia zaměříme na použití přímých metod, které lze bez problémů v běžných numerických výpočtových systémech aplikovat.

A konečně je nutno závěrem konstatovat, že neexistují publikace, které by se problematikou popisu dvouparametrového lomové mechanického popisu krátkých únavových trhlín zabývaly komplexně.

### 2.3 DVOUPARAMETROVÁ LOMOVÁ MECHANIKA

Dvouparametrová LELM uvažuje vliv constraintu tím, že pro popis chování napětí v okolí kořene trhliny bere v úvahu i druhý (konstantní) člen ve Williamsově rozvoji [18]. Tento člen se nazývá T-napětí je nenulový pouze v případě normálového namáhání a odpovídá složce napětí  $\sigma_{xx}$  a pro rozložení napětí, označíme-li polární souřadnice  $r$ ,  $\theta$  s počátkem ve vrcholu trhliny, pak v okolí vrcholu trhliny pro kombinovaný mód I a II platí:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_{xx}^I(\theta) & f_{xy}^I(\theta) \\ f_{yx}^I(\theta) & f_{yy}^I(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_{xx}^{II}(\theta) & f_{xy}^{II}(\theta) \\ f_{yx}^{II}(\theta) & f_{yy}^{II}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde  $K_I$ ,  $K_{II}$  jsou součinitele intenzity napětí pro normálový a smykový mód namáhání a  $f_{ij}^I, f_{ij}^{II}$  jsou bezrozměrné funkce polárního úhlu  $\theta$ .

Podle přístupu dvouparametrové lomové mechaniky je tedy parametr  $K$  stále používán pro kvantifikaci velikosti pole napětí v okolí kořene trhliny. Druhý parametr  $T$ , pak charakterizuje vliv geometrie tělesa a úrovně dosažené deformace na tahové napětí působící na čelo trhliny, a to jako důsledek různého stupně multiaxiality napětí. Tento parametr kvantifikuje úroveň constraintu v LELM.

U dvouparametrového pojetí EPLM musí mít dvě různé geometrie při stejném zatížení hodnotou  $J$ -integrálu i stejnou hodnotu  $Q$ -parametru, aby měly stejnou kritickou hodnotu  $J$ -integrálu  $J_C$ .  $Q$ -parametr je obvykle definován pomocí diferenčního pole napětí  $(\sigma_{ij})_{diff}$ . Diferenční pole je určeno jako rozdíl skutečného (aktuálního) napětí v okolí kořene trhliny a napětí odpovídajícího referenčního pole [7]. Po rozdělení napětí v okolí kořene trhliny platí

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_{ref} + Q\sigma_0\delta_{ij}, \quad (2)$$

kde  $(\sigma_{ij})_{ref}$  označuje zvolené referenční pole,  $\sigma_0$  mez kluzu a  $\delta_{ij}$  je Kroneckerovo delta.

Metodologie dvouparametrové lomové mechaniky je založena na základním předpokladu, podle kterého je lomové chování dvou těles identické, lze-li trhlinu v obou případech charakterizovat stejnou hodnotou prvního parametru (K-LELM, J-EPLM) a navíc i stejnou hodnotou parametru popisující constraint (T, Q). Tento předpoklad je nutno dodržet zejména při přenosu experimentálních dat měřených na malých laboratorních vzorcích na velká reálná tělesa.

## 2.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN

Základním postulátem lomově-mechanického popisu šíření a podmínek zastavení únavových trhlin je tvrzení, že křivka rychlosti šíření trhlin obr. 1, vyjádřená jako závislost rychlosti na amplitudě součinitele intenzity napětí, nezávisí na geometrii tělesa a zatěžovacích silách, ale pouze na materiálu. Jde tedy o materiálovou křivku.

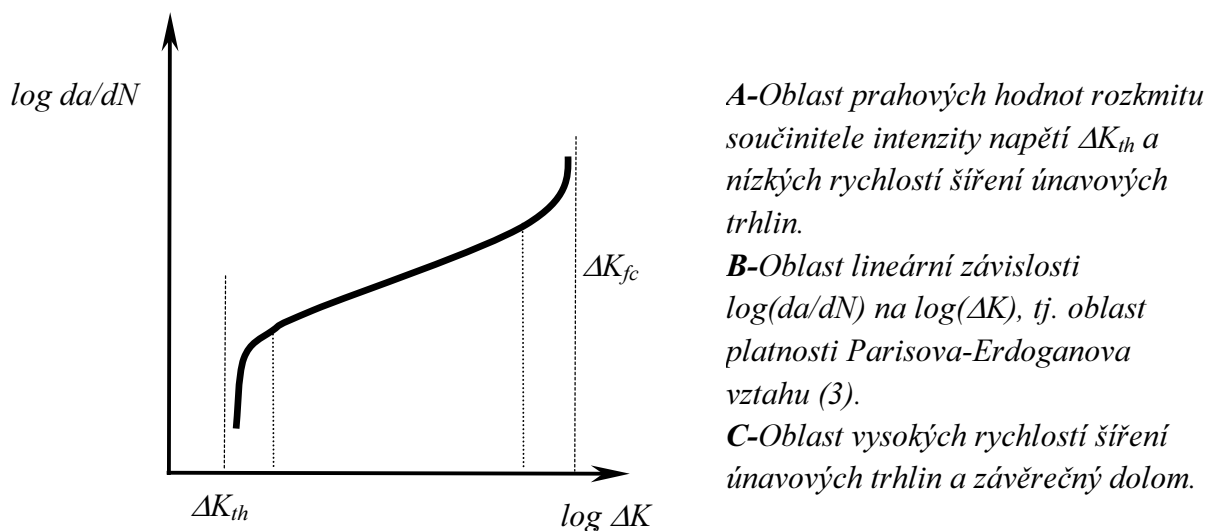
Pro formální matematický zápis křivky rychlosti šíření trhliny bylo navrženo několik rovnic. V praxi není příliš důležité, který z těchto popisů zvolíme. Podstatné je však to, že existuje prahová hodnota součinitele intenzity napětí  $\Delta K_{th}$ , pod kterou šíření nenastává. Tato hodnota je jednou z nejdůležitějších materiálových charakteristik. Dále je důležité, že křivka šíření ve svojí střední části B vyhovuje Parisovu-Erdoganovu vztahu

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad (3)$$

kde  $da/dN$  je přírůstek délky trhliny za jeden cyklus,  $C$  a  $m$  jsou materiálové konstanty a  $\Delta K$  je amplituda součinitele intenzity napětí, která všeobecně má tvar

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y, \quad (4)$$

kde  $\Delta \sigma$  je amplituda aplikovaného napětí,  $a$  je délka trhliny a  $Y$  je korekční funkce závislé na okrajových podmínkách.



**obr. 1** Typický průběh rychlosti šíření trhliny, jako funkce rozkmitu součinitele intenzity napětí.

Rozhodující význam prahové hodnoty jako materiálového parametru vyplývá z následující úvahy. Pro těleso s trhlinou délky  $a_0$  je podmínkou nešíření nerovnost

$$\Delta K(a_0) \leq \Delta K_{th}, \quad (5)$$

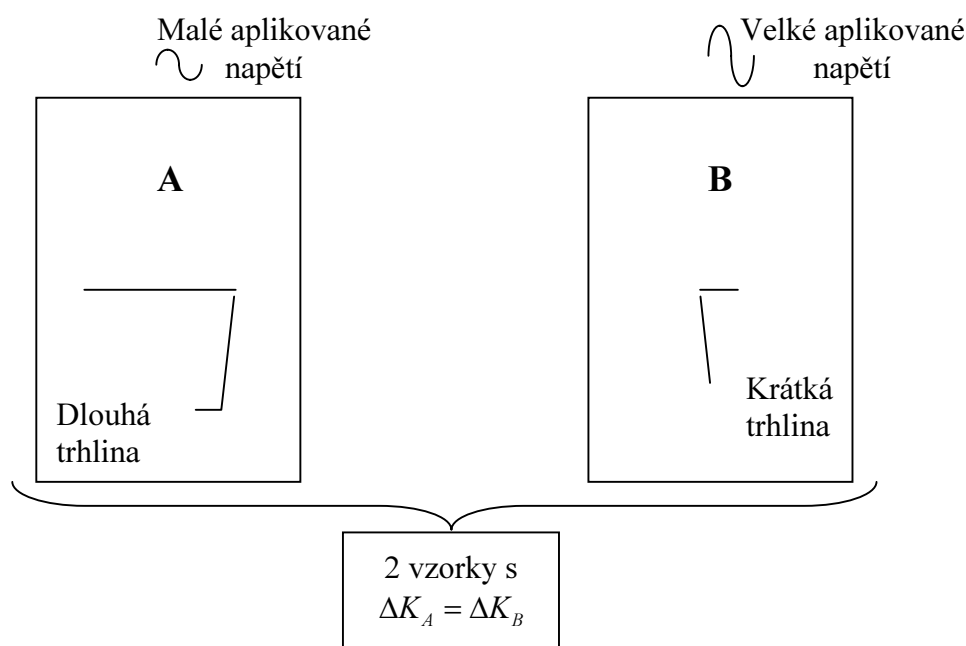
kde  $\Delta K$  má význam působícího amplitudy součinitele intenzity napětí.

## 2.5 PROBLEMATIKA KRÁTKÝCH ÚNAVOVÝCH TRHLIN

Jednou ze základních vlastností součinitele intenzity napětí by měla být invariantnost vůči zatěžujícímu napětí  $\sigma_{appl}$  a délce trhliny. Tuto vlastnost lze velmi zjednodušeně (po zanedbání vlivu konečných rozměrů tělesa) ilustrovat např. tak, že je-li těleso A s trhlinou délky  $a$  zatěžováno napětím s rozkmitem  $\Delta\sigma$  a těleso B s trhlinou  $a/4$  zatěžováno napětím s rozkmitem  $2\Delta\sigma$ , viz obr. 2, je u obou těles stejný rozkmit součinitele intenzity napětí

$$\Delta K_A = \Delta\sigma(\pi a)^{1/2} = 2\Delta\sigma(\pi a/4)^{1/2} = \Delta K_B, \quad (6)$$

a tedy i kvantitativně stejné pole napětí v okolí čela trhliny. Lze tedy očekávat i stejnou rychlost šíření trhliny  $da/dN$ . Experimentální výzkumy v poslední desetiletí však prokázaly, že uvedená vlastnost má pouze omezenou platnost – objevil se problém tzv. krátkých trhlin. Protože součinitel intenzity napětí neumožňuje dostatečně přesný popis pole napětí a deformací, vznikajících v okolí čela krátké trhliny při vysokých úrovních napětí, není pomocí něj ani možné zcela jednoznačně popsat šíření těchto trhlin. Tím je zpochybněna použitelnost poznatků jednoparametrové lineární lomové mechaniky. Krátká trhlina je pojem relativní, závislý na úrovni napětí, resp. deformace. Porovnáním chování klasické (tj. dlouhé) únavové trhliny při nízkém rozkmitu napětí a krátké trhliny při vysokém rozkmitu napětí bylo zjištěno, že při formálně tomtéž  $\Delta K$  může být rychlost šíření krátké trhliny podstatně větší, než rychlost šíření dlouhé trhliny. Naznačený rozdíl je tím větší, čím větší je v případě krátké trhliny rozkmit napětí.



**obr. 2** Schématická ilustrace  $\Delta K$  jako řídicí síly únavového růstu trhliny.



Suresh a Ritchie [16] navrhli následující definice rozdělení krátkých trhlin:

- (a) *mikrostrukturuálně krátké trhliny* – jsou to únavové trhliny jejichž velikost je srovnatelná s charakteristickou velikostí mikrostrukturálních součástí materiálů jako je např. velikost zrna monolitického materiálu
- (b) *mechanicky krátké trhliny* – jsou to malé trhliny kde plastická oblast u kořene trhliny je srovnatelná s velikostí trhliny nebo jsou to trhliny v plastizovaném materiálu např. v kořeni vrubu.
- (c) *fyzikálně krátké trhliny* - jsou to únavové trhliny, které jsou větší než mikrostrukturuální součásti materiálu nebo než plastická oblast, ale jsou menší než jeden nebo dva milimetry
- (d) *chemicky krátké trhliny* – jsou to únavové trhliny které by byly normálně řazeny pod LELM, ale ukazují zřejmé odlišnosti rychlosti růstu, vyplývající z okolního korosivního prostředí.

Příčiny, které způsobují odlišnosti v chování krátkých a dlouhých trhlin jsou do značné míry známy. Použití lomové mechaniky pro popis šíření únavových trhlin je založeno na celé řadě zjednodušujících předpokladů, které můžeme u dlouhých trhlin považovat za splněné (např. zanedbatelná velikost plastické zóny před čelem trhliny, homogenní a izotropní těleso, jednoduše definovaný tvar čela trhliny). Zcela odlišná situace však nastává v oblasti krátkých trhlin. Značný vliv zřejmě získávají odlišnosti ve velikosti plastické oblasti na čele trhliny, roste vliv orientace a zejména hranic zrna apod.

### 3 CÍL PRÁCE

Těžiště našeho snažení a současně hlavním cílem naší práce je aplikace dvouparametrové lineární elastické lomové mechaniky na oblast šíření krátkých trhlin a zejména těch, které jsou ovlivněné existencí materiálového rozhraní. Přitom navážeme na již získané experimentální a numerické poznatky, které se týkají především vlivu constraintu na rychlost šíření dlouhých únavových trhlin.

Při studiu krátkých únavových trhlin se převážně soustředíme na typ mikrostrukturálních krátkých trhlin. V tomto případě dochází k podstatné změně v hodnotě constraintu na jejím čele vlivem vzájemné polohy a orientace hranice zrna a trhliny. Hranice zrna je modelována jako rozhraní dvou různých materiálů a je tedy nutno nejprve podrobněji studovat interakci mezi trhlinou a rozhraním. Jak v oblasti výpočtové tak i v oblasti modelové představuje interakce rozhraní – trhlina komplikovaný problém, který nelze řešit standardními postupy. Navíc, existence rozhraní vyvolává obecně kombinovaný stav namáhání na čele trhliny. Další nutně řešenou problematikou je tedy popis vlivu constraintu na směr šíření trhliny, případně na podmínky chování trhliny namáhané kombinovaným módem namáhání.

Mechanicky krátké únavové trhliny jsou zde studovány pouze okrajově, vlastnosti fyzikálně krátkých trhlin je možno z hlediska dvouparametrové lomové mechaniky studovat v souvislosti se konkrétním problémem analogicky jako dlouhé trhliny, jedná se

v podstatě pouze o volbu vhodného měřítko. Studium chemicky krátkých únavových trhlin není v rámci navrženého fenomenologického modelu smysluplné.

## 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

K popisu krátkých únavových trhlin v rámci dvouparametrové lomové mechaniky je třeba kromě známého rozložení napětí studovat vliv druhého parametru na chování trhlin a to zejména na rychlost šíření trhliny a navrhnout výpočtové modely mikrostrukturálně a mechanicky krátké trhliny.

### 4.1 FENOMENOLOGICKÝ POPIS ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Pro jednoduchost předpokládejme, míjivý zatěžovací cyklus parametr asymetrie cyklu  $R=K_{\min}/K_{\max}=0$ , tzn.  $K_{\min}=0$  a tudíž  $\Delta K=K_{\max}=K$ . Dále se omezíme na oblast platnosti Parisova vztahu pro rychlost šíření únavové trhliny  $da/dN-K$  viz obr. 1 .

Při cyklickém zatěžování, na čele rostoucí trhliny vzniká monotónní a cyklická (nebo reverzní) plastická zóna. Vlastnosti plastické zóny jsou pak rozhodující pro další šíření únavové trhliny. Za podmínek malé plastické zóny v oblasti vysokocyklové únavy je obvykle rychlost šíření únavových trhlin popisovaná pomocí závislosti typu rychlost šíření versus součinitel intenzity napětí [8]. V rámci lineární elastické lomové mechaniky existuje jednoznačná relace mezi velikostí plastické zóny a hodnotou součinitele intenzity napětí  $r_p=r_p(K)$ . V řadě případů je výhodnější použít pro popis rychlosti šíření únavové trhliny  $da/dN$  jako řídicí parametr některou s charakteristik popisujících velikost plastické zóny

$$da/dN = F(r_p(K)) \quad (7)$$

Předpoklad jednoznačného vztahu mezi  $da/dN$  a  $K$  nezávislého na geometrii vzorku a fakt, že velikost plastické zóny závisí na geometrii vzorku si navzájem odporují. Jestliže constraint (vyjádřený hodnotou T-napětí) má vliv na velikost plastické zóny musí také ovlivňovat rychlost růstu únavové trhliny  $da/dN$  a křivka závislosti  $da/dN$  versus  $K$  je ovlivněna geometrií použitých vzorků. Za předpokladu dvouparametrové lomové mechaniky velikost plastické zóny je funkcí aplikovaného zatížení daného součinitelem intenzity napětí  $K$  a taktéž hodnotou T-napětí. Tedy rovnice (7) zahrnuje efekt pole napětí v blízkosti kořene trhliny, včetně T-napětí, na rychlost šíření únavové trhliny.

Předpokládejme tedy, že rychlost šíření únavové trhliny je popsána velikostí plochy plastické zóny okolo kořene únavové trhliny  $R_p=R_p(K,T)$ . Cílem je tedy korelace rychlostí růstu únavových trhlin různých geometrií (například laboratorní vzorek a reálná konstrukce) s různou úrovní constraintu (hodnotou T-napětí).

Velikost plastické zóny pro případ nulového constraintu označme  $R_p^0=R_p(K,T=0)$  podobně  $R_p(K,T\neq 0)$  plocha plastické zóny v reálné konstrukci s nenulovou hodnotou constraintu. Obě veličiny byly spočítány za použití numerického konečnoprvkového systému ANSYS. Materiálové vlastnosti byly charakterizovány Rambergovým-Osgoodovým vztahem platícím pro monotónní zatěžování a popisující relaci mezi celkovou deformací  $\varepsilon$  a napětím  $\sigma$ :

$$\sigma = H\varepsilon^n, \quad (8)$$

kde  $H = H(\sigma_0)$  je materiálová konstanta, která je funkcí meze kluzu  $\sigma_0$  a  $n$  je koeficient zpevnění. Výpočet byl proveden pro různé typy materiálů viz [8]. Vliv T-napětí na velikost plochy plastické zóny  $R_p(K,T)$  byla určena použitím modifikované metody okrajové vrstvy např.[1]. Popis simuluje různé podmínky v blízkosti kořene pro libovolné geometrie za předpokladu rozumné plasticity v tělese. Výsledky numerických výpočtů poukazují na vztah mezi  $R_p(K,T)$  a  $R_p(K,T=0)$ , který téměř nezávisí na koeficientu zpevnění  $n$  a lze jej vyjádřit ve tvaru:

$$R_p(K,T) = \lambda(T/\sigma_0) R_p^0(K,T=0), \quad (9)$$

kde

$$\lambda(T/\sigma_0) = 1 - 0.30 \left(\frac{T}{\sigma_0}\right) + 0.52 \left(\frac{T}{\sigma_0}\right)^2 - 0.85 \left(\frac{T}{\sigma_0}\right)^3, \quad (10)$$

viz obr. 3

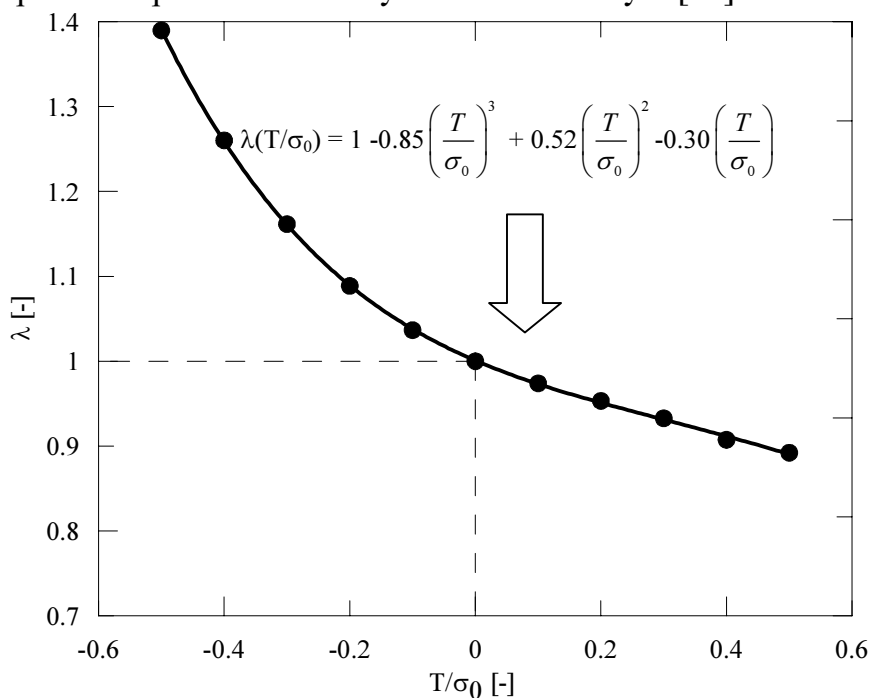
Rovnici (7), pro rychlost šíření únavové trhliny lze přepsat jako:

$$da/dN = F^* [\lambda(T/\sigma_0) R_p^0]. \quad (11)$$

Užitím Parisova – Erdoganova vztahu rovnice (3) pro rychlost šíření  $da/dN$  namísto obecné funkce  $F^*(S_p^0)$  obdržíme:

$$da/dN = C [\lambda(T/\sigma_0)]^m K^m. \quad (12)$$

Uvedená rovnice (12) reprezentuje modifikovaný Parisův-Erdoganův zákon, který je schopen zachytit vliv T-napětí.  $C$  a  $m$  jsou materiálové konstanty naměřené pro  $T=0$ . Uvedený popis odpovídá experimentálním výsledkům uvedeným [17].



obr. 3 Závislost  $\lambda = \lambda(T/\sigma_0)$

## 4.2 METODIKA VÝPOČTU LOMOVĚ MECHANICKÝCH PARAMETŮ

Nutným předpokladem pro aplikace dvouparametrové lomové mechaniky je znalost hodnot T-napětí (LELM) a Q-parametru (EPLM). Obdobně jako při výpočtu hodnot součinitele intenzity napětí K, lze i na stanovení hodnot T-napětí aplikovat každou numerickou metodu použitelnou pro analýzu napjatosti v okolí kořene trhliny.

Literární přehled numerických postupů používaných k výpočtům T-napětí u těles s konečnými rozměry je částečně uveden v práci Bednáře [4]. V této práci se zaměříme pouze metody, které jsou použity k výpočtu naší studované problematiky.

### *Přímé metody*

Přímé metody (např. [3], [6]) jsou založeny na porovnání numerických výsledků (např. MKP) s výsledky získanými z analytických vztahů, jež jsou odvozeny pomocí Williamsova rozvoje [18].

V prvním případě bylo T-napětí určeno na základě porovnání numericky získaných hodnot složky napětí  $\sigma_{xx}$  na lici trhliny, tj. pro  $\theta=\pi$

$$T = \sigma_{xx} - \frac{2K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (13)$$

a to zejména v případě kdy trhlina byla zatížena čistým normálovým módem tzn.  $K_{II}=0$  a rovnice pak má tvar  $T = \sigma_{xx}$ .

Ve druhém postupu výpočtu hodnoty bylo T-napětí určeno z posuvů  $u_x$  před čelem trhliny čili pro  $\theta=0$ .

$$T = \frac{2\mu u_x}{r(1-\nu)} - \frac{K_I(k-1)}{\sqrt{2\pi r(1-\nu)}} \quad (14)$$

Ve třetím případě pak byla použita diferenční metoda [13], která využívá faktu, že parametr T se vztahuje pouze ke složce napětí  $\sigma_{xx}$ , v případě uvážení dvou členů Williamsově rozvoje, lze eliminovat vliv součinitele intenzity napětí. (složky napětí jsou vypočteny pro  $\theta=0$ ).

$$T = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})_{\theta=0} \quad (15)$$

Ve všech shora uvedených případech byla konečná hodnota parametru T získána extrapolací lineární části závislosti (13) (14) (15) pro  $r \rightarrow 0$ .

Q parametr je obvykle definován pomocí diferenčního pole napětí  $(\sigma_{\theta\theta})_{diff}$ . Diferenční pole je určeno jako rozdíl skutečného (reálného) napětí v okolí kořene trhliny a napětí odpovídajícího referenčního pole. V závislosti na definici referenčního napětí lze diferenční pole stanovit dvěma způsoby. První možnost je v použití HRR modelu  $(\sigma_{\theta\theta})_{HRR}$  a druhá možnost je ve výpočtu referenčního pole vztaženého na případ nulové hodnoty T-napětí  $(\sigma_{\theta\theta})_{SSY, T=0}$  např. [4].

Pro určení hodnoty Q-parametru je nutné normovat diferenční pole hodnotou meze kluzu  $\sigma_0$  ve vzdálenosti  $r=2J/\sigma_0$  a pro úhel  $\theta=0$ .

$$Q = (\sigma_{\theta\theta})_{diff} / \sigma_0 \quad (16)$$

## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

### 5.1 DLOUHÉ ÚNAVOVÉ TRHLINY

V rámci sledované problematiky a s cílem experimentálně ověřit předchozí úvahy bylo provedeno následující numerické zpracování uvedeného experimentu.

Postup vyhodnocení experimentů byl následující:

Ze známých hodnot pro experimentální vzorek:

$a$ -délka trhliny

$K$ - součinitel intenzity napětí

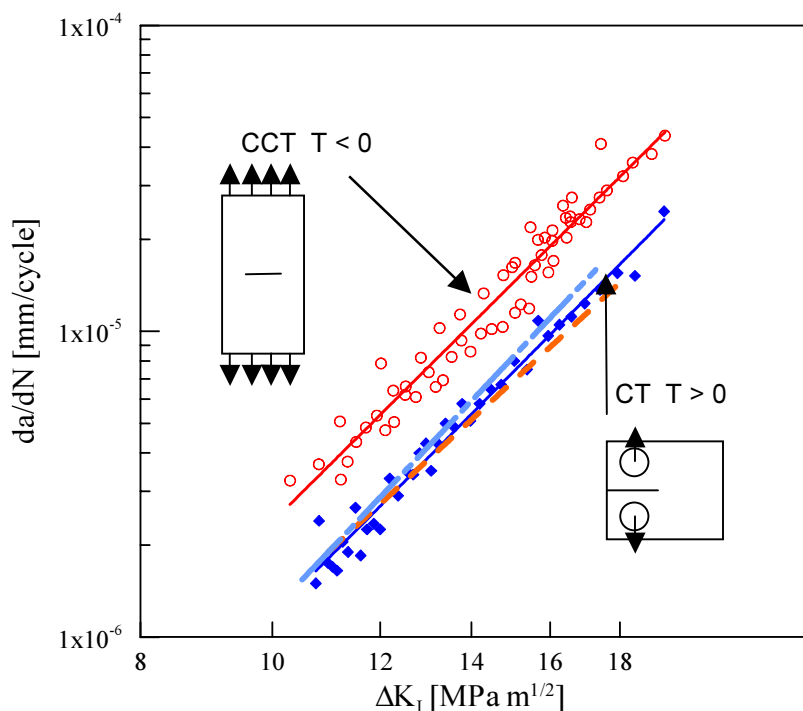
$W, L$ -geometrické charakteristiky

$\sigma_0$ - mez kluzu

určíme pro konkrétní konfiguraci hodnotu  $T$ -napětí. Známe-li hodnotu  $T$ -napětí, dosadíme ji do rovnice (10), ze které získáme hodnotu bezrozměrné přepočtové konstanty  $\lambda(T/\sigma_0)$ . Odtud vynásobením původní hodnoty součinitele intenzity napětí dostaneme  $K_{\text{eff}}$ , které je bez vlivu  $T$ -napětí.

Vynesením efektivních hodnot součinitele intenzity napětí v závislosti na rychlosti šíření únavové trhliny, viz obr. 4 získáme pro oba studované vzorky v rámci dvouparametrového popisu v oblasti nižších hodnot součinitele intenzity napětí (ve studovaném případě do  $K_I=14 \text{ MPa m}^{1/2}$ , kdy hodnoty  $T/\sigma_0$  se pohybují v intervalu (0.2; -0.3)) téměř identickou křivku. Čili můžeme konstatovat, že dvouparametrová lomová mechanika sjednocuje v daném intervalu popis rychlosti šíření pro různé geometrie.

Pro vyšší hodnoty součinitele intenzity napětí a v důsledku toho i pro vyšší hodnoty  $T$ -napětí, nelze již tuto aproximaci aplikovat a lze říci, že z důvodu bezpečnosti je vhodnější použít popis pomocí jednoparametrové lomové mechaniky.



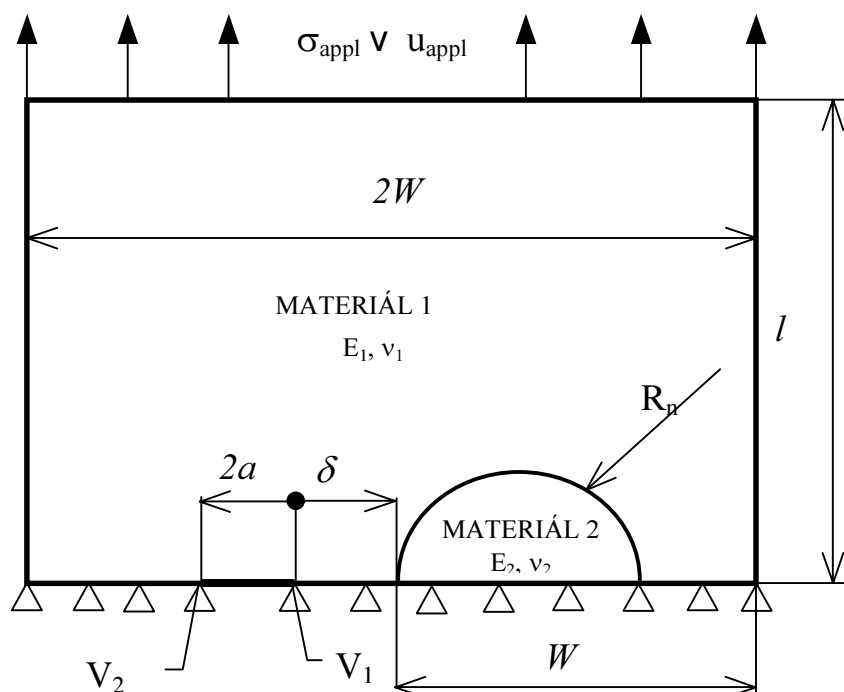
**obr. 4** Rychlost růstu únavové trhliny v oblasti platnosti Parisova zákona pro 0.65 % uhlíkovou ocel při pokojové teplotě. Čerchované křivky jsou s uvážením vlivu  $T$ -napětí.

## 5.2 KRÁTKÉ TRHLINY

Kapitola je zaměřena na studium trhlin a to mikrostrukturálně a mechanicky krátkých v rámci dvouparametrové lomové mechaniky. Přičemž důraz je kladen především na mikrostrukturálně krátké trhliny zatímco mechanicky krátké jsou zde studovány pouze okrajově. Pro úplný popis chování trhliny v rámci lineární elastické a elasto-plastické lomové mechaniky je nezbytná znalost hodnot parametrů popisující chování krátké trhliny tzn. součinitelů intenzity napětí  $K_I$ ,  $K_{II}$  a T-napětí respektive J-integrálu a Q-parametru. Z hlediska modelování lze označit za krátké trhliny takové, jejichž chování je anomální z hlediska srovnání s chováním u dlouhých trhlin 2.5.

### 5.2.1 Modelování krátkých trhlin

K tomu abychom mohli objektivně posoudit chování krátkých únavových trhlin v rámci lomové mechaniky je třeba nejprve navrhnout odpovídající výpočtové modely pro mikrostrukturálně krátkou viz obr. 5 a obr. 6 a pro mechanicky krátké viz obr. 7 .

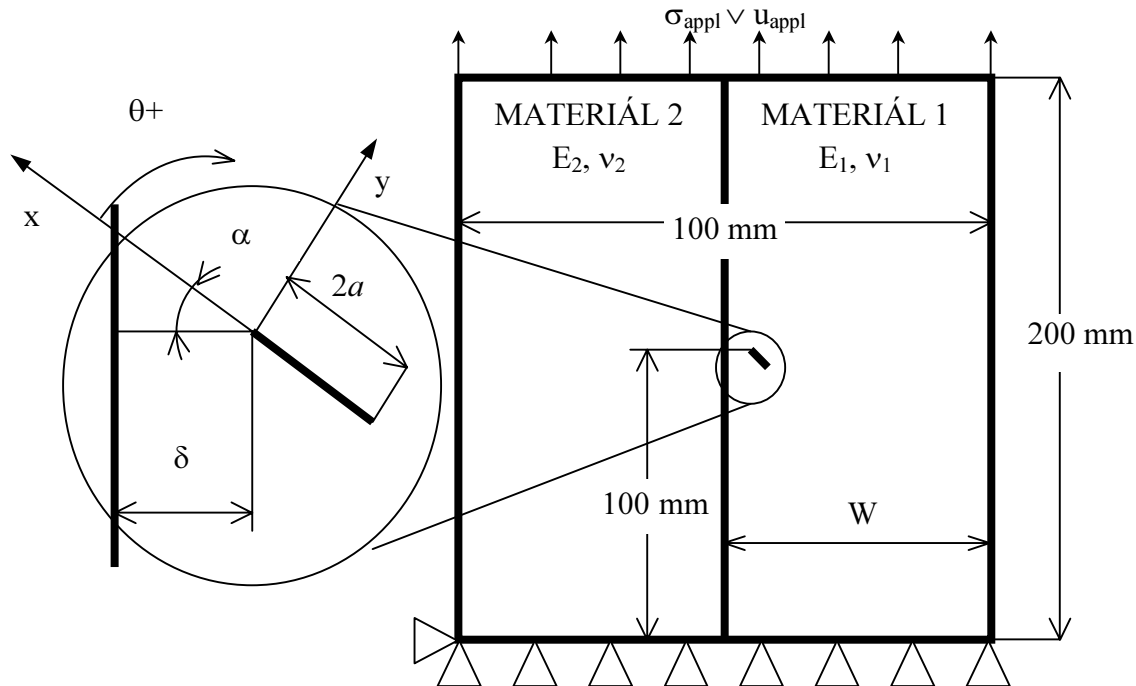


**obr. 5** Model použitý k výpočtu parametrů charakterizující chování trhliny v blízkosti nehomogenity. Délka trhliny  $2a = 1 \text{ mm}$ ,  $\delta = 1 \text{ mm}$ ,  $W = 50 \text{ mm}$  a  $l = 100 \text{ mm}$ .

Pro chování takových mikrostrukturálně krátkých trhlin může být rozhodující jejich interakce s nejbližším materiálovým zrnem. Navíc je nutno uvážit i skutečnost, že jednotlivá materiálová zrna jsou anizotropní a tedy vzhledem k různé vzájemné orientaci sousedních zrn se jedná o oblasti s různými materiálovými charakteristikami. V našem případě modelujeme tedy strukturu materiálu jako nehomogenní prostředí tvořené jednotlivými materiálovými zrny s odlišnými vlastnostmi oddělenými hranicí podél níž se materiálové parametry mění skokem. Hodnota elastických konstant jednotlivých materiálů záleží na jejich orientaci s ohledem na aplikované zatížení. Dvě sousední oblasti s rozdílnou orientací reprezentují v tomto modelu dva různé izotropní materiály, s hodno-

tami elastických konstant  $E_1$ ,  $E_2$  (modul pružnosti v tahu),  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  (Poissonova konstanta) pro oba materiály.

V první případě je mikrostrukturně krátká trhlina modelovaná jako trhlina v blízkosti nehomogenity, která mění svou velikost  $R_n$  přičemž vrchol  $V_1$  zůstává stále ve stejné vzdálenosti  $\delta$  od materiálové nehomogenity viz obr. 5. Materiálová nehomogenita je modelována jako kruhová inkluze a složky vektoru posuvu jsou na rozhraní mezi dvěma materiály spojitě (tj. případ ideální adheze).

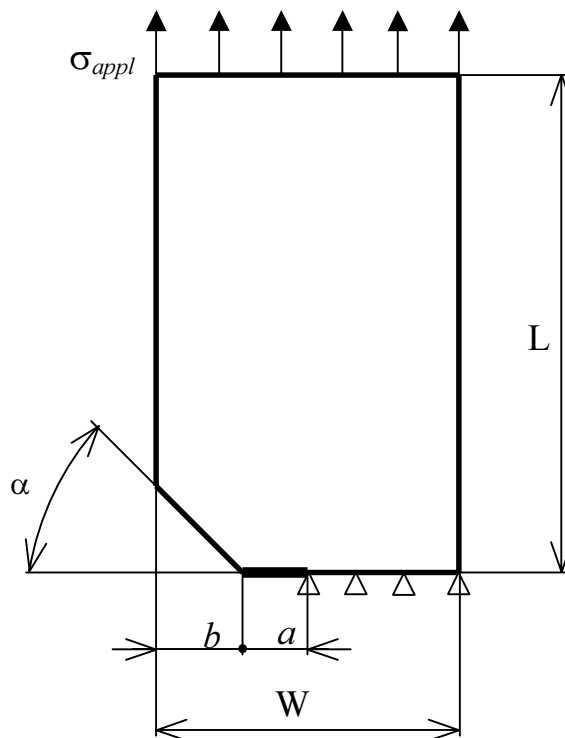


**obr. 6** Studovaná konfigurace trhliny v blízkosti materiálového rozhraní. Orientace trhliny vzhledem k rozhraní je daná úhlem  $\alpha$ . Geometrický model je navržen tak aby odpovídal trhlíně v nekonečně velkém tělese zatíženém vnějším namáháním  $\sigma_{appl}$  ve směru rozhraní.

Druhý použitý výpočtový model použitý při studii chování mikrostrukturálně krátkých trhlin je zobrazen na obr. 6. Bi-materiálové rozhraní je modelováno jako hranice mezi dvěma různými materiály. Předpokládáme, že složky posuvu jsou na hranici spojitě (dokonalá adheze). Vzhledem k tomu, že předmětem našeho zájmu je studie vlivu materiálového rozhraní, orientace trhliny a délky trhliny na lomové mechanické veličiny charakterizující rozdělení napětí v okolí vrcholu trhliny, lze pro sledované cíle použít navržený model uvedený na obr. 6. Uvedená konfigurace odpovídá trhlíně v nekonečně velkém bi-materiálovém tělese a uspokojivě modeluje vliv rozhraní materiálů na hledané charakteristiky.

Studované mechanicky krátké trhliny jsou modelovány jako trhliny iniciované a rostoucí z kořene V-vrubu viz obr. 7. Pro velmi krátké trhliny,  $a/b \ll 1$ , kde  $a$  značí délku trhliny a  $b$  hloubku V-vrubu, viz obr. 7, to tak, že mechanicky krátká trhlina se celá nachází v plastické zóně V-vrubu. Pro lineární elastickou lomovou mechaniku byla přesnost řešení testována s užitím homogenního tělesa (tj. pro  $E_1 = E_2$ ) srovnáním numericky vypočtených hodnot  $K_I$ ,  $K_{II}$  a  $T$  s příslušnými hodnotami těchto veličin

získanými na základě analytických výrazů. V případě existence rozhraní (tj. pro nehomogenní prostředí) byla sledována závislost vypočtených veličin na hustotě použité sítě MKP. Použitá síť MKP byla navržena tak, aby její další zjemňování v okolí vrcholu trhliny již nemělo vliv na vypočtené hodnoty ve všech případech studovaných materiálových poměrů  $E_1/E_2$ .



**obr. 7** Numerický model mechanicky krátké trhliny iniciované v kořeni V-vrubu.

V případě výpočtů prováděných v rámci elasto plastické lomové mechaniky byl výpočet J-integrálu otestován pro homogenní lineárně elastické těleso přičemž k přepočtu mezi K a J-integrálem bylo užito přepočtových vztahů [1].

### 5.2.2 Numerické výsledky

- **Mikrostrukturálně krátká trhlina**

Připomeňme, že se jedná o únavové trhliny jejichž velikost je srovnatelná s charakteristickou velikostí mikrostrukturálních součástí materiálů jako je např. velikost zrna monolitického materiálu.

#### *Lineární elastická lomová mechanika - hodnoty lomových parametrů*

V prvním kroku se zaměříme na trhlinu v blízkosti kruhové nehomogenity, kde bude zkoumán především vliv změny velikosti nehomogenity a způsobu zatěžování (silové, deformační). Ve druhém kroku pak přistoupíme ke studii vlivu materiálového rozhraní v nekonečném tělese, což lze chápat jako trhlinu v blízkosti nehomogenity s nekonečným poloměrem.



Přitom předpokládáme, že oba materiály jsou charakterizovány poměrem  $E_1/E_2$ , kde  $E_1$ ,  $E_2$  jsou hodnoty Youngova modulu pro materiál 1 a 2, přičemž hodnota pro materiál 1 bude ponechána stále stejná  $E_1=2.1 \times 10^5$  MPa (stejně jako v homogenním případě). Poissonova čísla  $\nu$  byla volena pro oba materiály stejná  $\nu_1=\nu_2=0.3$ . Poznamenejme, že hodnota poměru  $E_1/E_2$  závisí na velikosti vzájemné disorientace jednotlivých materiálových zrn.

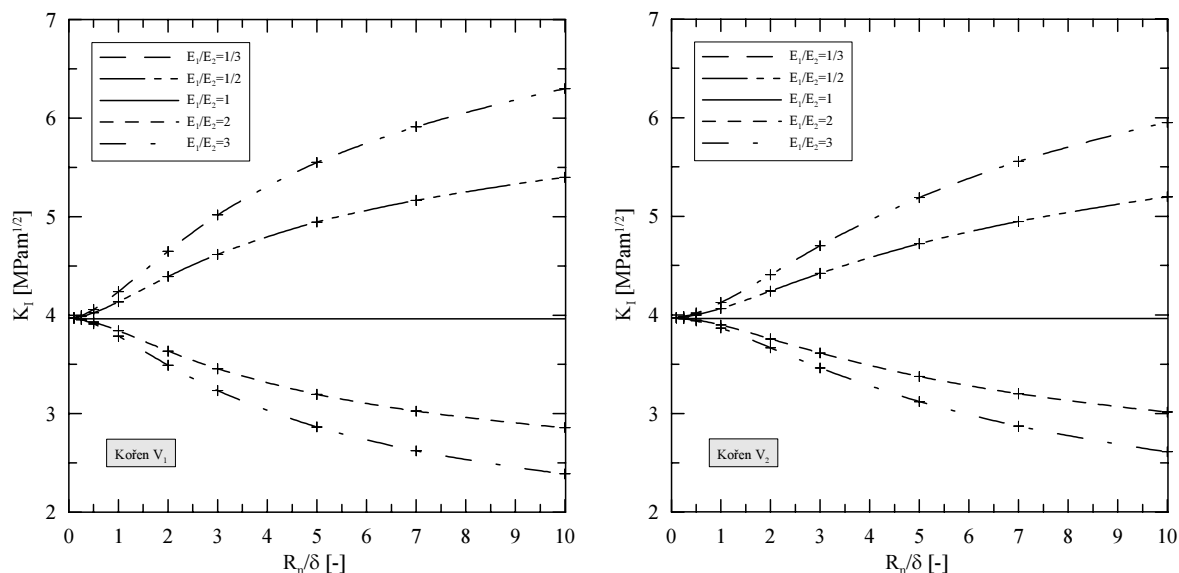
### ➤ trhlina v blízkosti materiálové nehomogenity viz obr. 5

Výsledky numerických výpočtů, které byly získány v rámci řešení presentované problematiky tvoří hodnoty lomově mechanických parametrů  $K_I$ ,  $T$  pro krátkou trhlinu v blízkosti nehomogenity zatíženou silově ( $\sigma_{\text{appl}} = 100$  MPa) a deformačně ( $u_{\text{appl}} = \sigma_{\text{appl}} \times l/E$ ).

Hodnoty  $K_I$ ,  $T$  jsou určeny v závislosti na měnící se velikosti ( $R_n$ ) existující nehomogenity a poměru Youngových modulů  $E_1/E_2$ .

V první fázi jsou sledovány oba kořeny mikrostrukturálně krátké trhliny, které jsou označeny  $V_1$  (kořen blíže nehomogenity) a  $V_2$  (vzdálenější) viz obr. 5

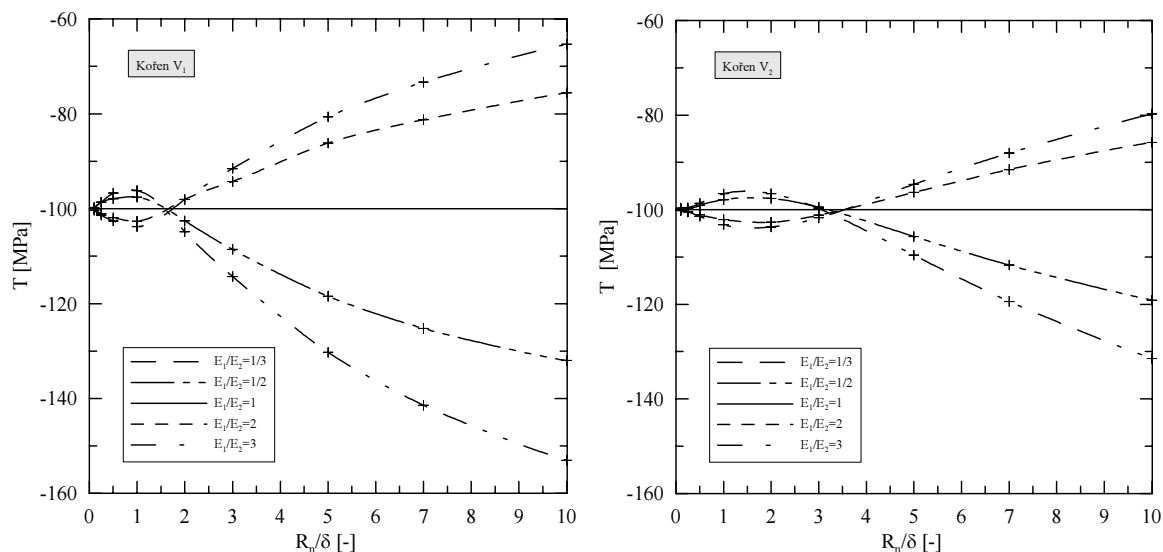
Hodnoty součinitele intenzity napětí pro silové zatížení pro oba vrcholy trhliny  $V_1$ ,  $V_2$  ( $\sigma_{\text{appl}} = 100$  MPa) jsou znázorněny na obr. 8. Hodnoty součinitele intenzity napětí se mění podle toho zda se trhlina nachází u nehomogenity s nižší (vyšší) hodnotou Youngova modulu než má materiál ve kterém se nachází trhlina. A to tak že pro poměry  $E_1/E_2$  menší než 1 hodnota součinitel intenzity pro stejné zatížení narůstá. Podle předpokladu kdy nehomogenita má zanedbatelný rozměr ( $R_n$  jdoucí k nule) součinitel intenzity napětí se blíží hodnotě jako v homogenním případě. Porovnáním grafů pro jednotlivé vrcholy trhliny je vidět, že vrchol  $V_1$  (Blíže k nehomogenitě) je výrazněji ovlivněn než kořen vzdálenější  $V_2$ .



**obr. 8** Hodnoty součinitele intenzity napětí ovlivněné existencí materiálové nehomogenity pro trhlinu délky  $2a=1$  mm zatížené  $\sigma_{\text{appl}}=100$  MPa

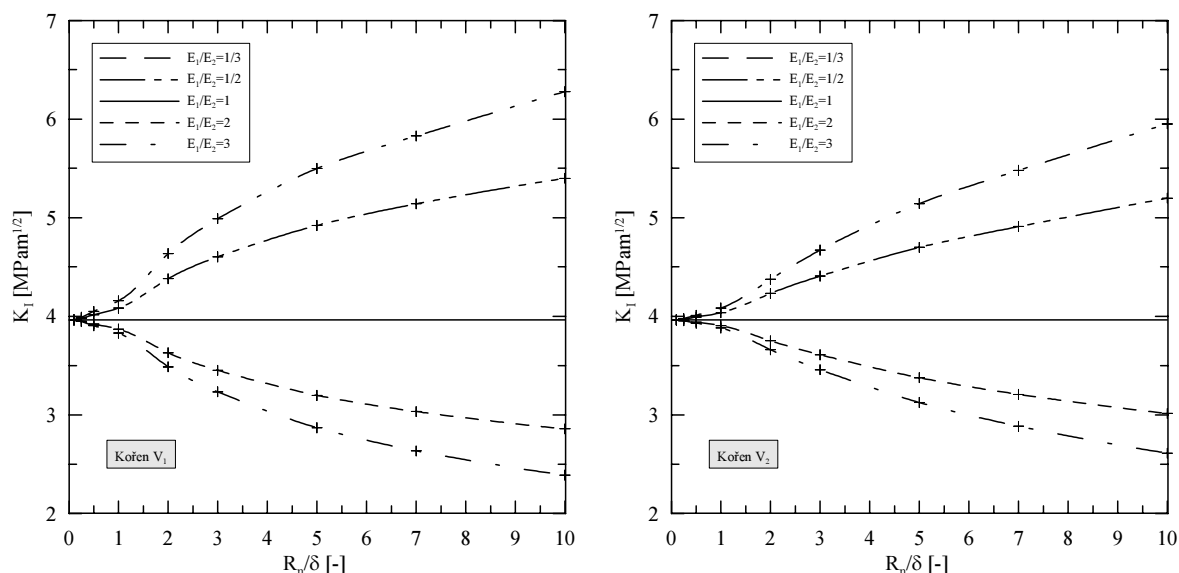
Pro popis v rámci dvouparametrové lomové mechaniky je třeba kromě součinitele intenzity napětí určit ještě druhý parametr charakterizující chování trhliny. Na obr. 9 lze vidět průběh hodnoty  $T$ -napětí. Přičemž má obecně stejný trend jak součinitel intenzity napětí, s tím rozdílem že pro poměry nehomogenity ku vzdálenosti kořene malých hodnot

dochází k poklesu T-napětí. Je to zřejmě způsobeno tím, že nehomogenita pak působí jako koncentrátor napětí a tím dochází k odlehčení koncentrace u kořenů trhliny. opět je vidět, že hodnoty T-napětí pro vrchol blíže nehomogenity je vliv změny materiálu výraznější.



**obr. 9** Hodnoty T-napětí ovlivněné existencí materiálové nehomogenity pro trhlínu délky  $2a=1$  mm zatížené  $\sigma_{appl}=100$  MPa

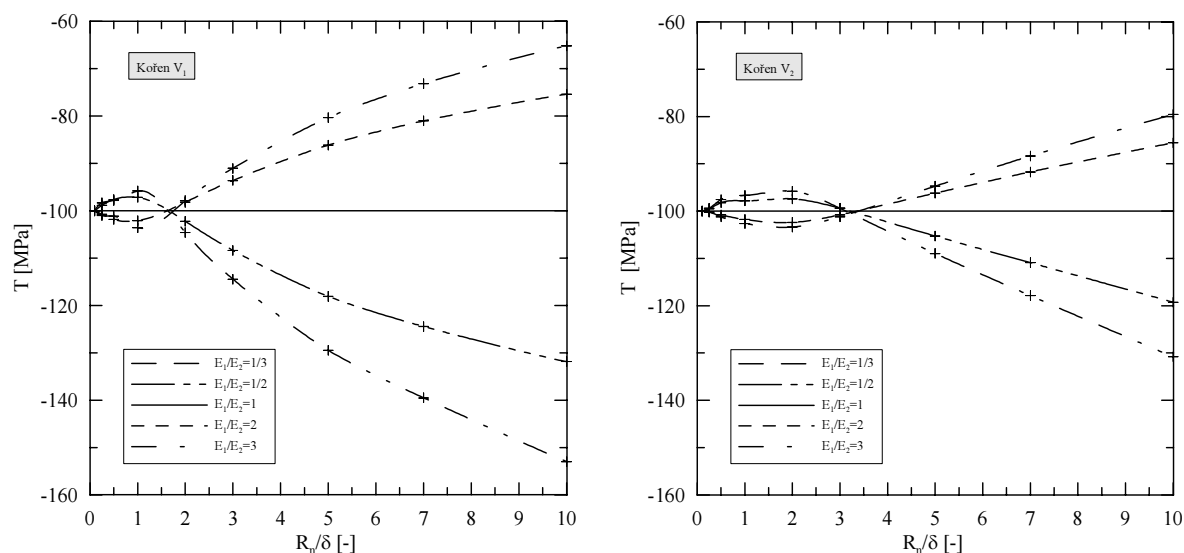
Pro srovnání vlivu zatížení výpočtového tělesa jsou na obr. 10 a obr. 11 vyneseny hodnoty součinitele intenzity napětí K a T-napětí pro trhlínu v tělese zatíženém deformačně ( $u_{appl} = konst.$ ). Hodnoty sledovaných lomově mechanických parametrů při tomto zatížení dosahují menšího ovlivnění při zachování stejného trendu chování. Proto v práci je dále uvažováno pouze zatížení silovým namáháním.



**obr. 10** Hodnoty součinitele intenzity napětí ovlivněné existencí materiálové nehomogenity pro trhlínu délky  $2a=1$  mm zatíženou deformačně.

## Výsledky této části výpočtů lze shrnout následovně:

Byl proveden výpočet vlivu velikosti nehomogenity na chování mikrostrukturálně krátké trhliny. Byl prokázán zřejmý vliv změny poměru Youngových modulů na vypočtené lomové mechanické parametry. Bylo porovnán dvojí způsob namáhání výpočtového modelu s konstatováním, že při odpovídajícím silovém namáhání má vliv sousedního materiálu je na hodnoty lomové mechanických parametrů podstatnější.



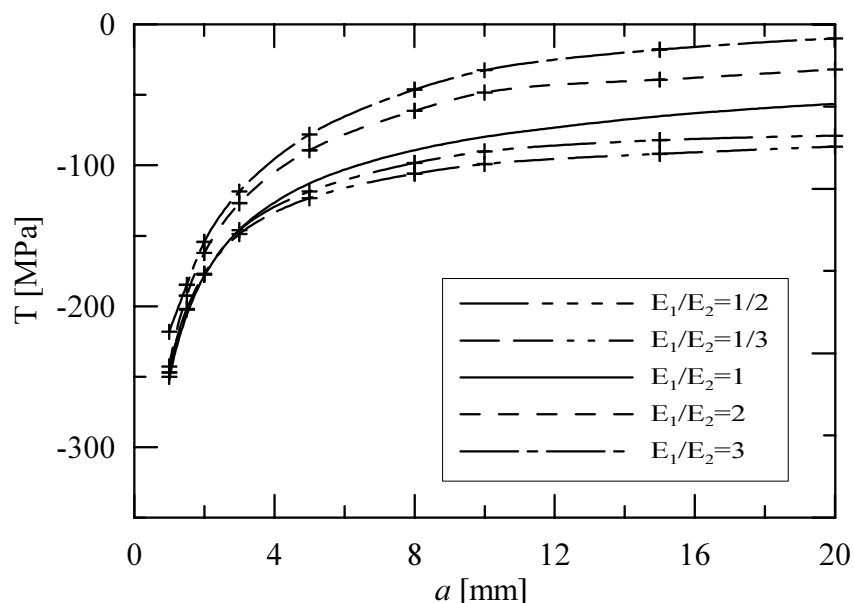
**obr. 11** Hodnoty  $T$ -napětí ovlivněné existencí materiálové nehomogenity pro trhlínu délky  $2a=1$  mm zatíženou deformačně.

### ➔ trhlina v blízkosti nekonečného materiálového rozhraní

Výpočet parametrů dvouparametrové lomové mechaniky pro trhliny v blízkosti nekonečného materiálového rozhraní (což lze chápat jako trhlínu v blízkosti nehomogenity s nekonečným poloměrem) je obsahem této části. Speciálně se zaměříme na výpočet mikrostrukturálně krátké trhliny. Přičemž jsou zde i uvedeny pro srovnání dvouparametrové hodnoty dlouhých trhlin.

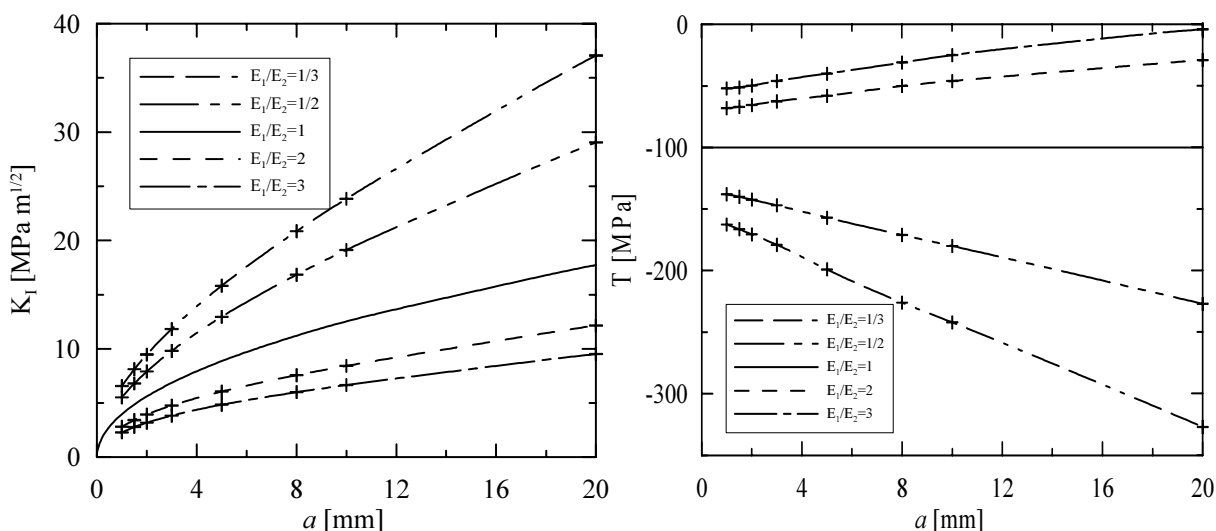
Poznamenejme, že z dříve uvedených důvodů, zde bylo studováno pouze silové namáhání trhliny.

Studie vlivu poměru Youngových modulů na velikost druhého parametru ( $T$ -napětí) při měnící se délce trhliny, bližší kořen trhliny zůstával stále ve stejné vzdálenosti  $\delta=1$  mm délka trhliny  $2a$  se měnila od 1mm do 20 mm. Vnější aplikované namáhání bylo voleno tak, aby ve všech případech (tj. pro všechny délky trhliny a všechny studované hodnoty poměru  $E_1/E_2$ ) byla hodnota součinitele intenzity napětí konstantní tj.  $K_I=10$  MPa m<sup>1/2</sup>. Pro kratší délky trhliny jsou tedy hodnoty vnějšího namáhání větší. Trendy křivek  $T$ -napětí jsou obdobné jak v homogenní případě obr. 12, jako důsledek vlivu existence materiálového rozhraní zaznamenáváme pokles či nárůst hodnoty  $T$ -napětí dle toho jaký poměr Youngových modulů materiálu sledujeme (menší či větší jak 1). Pro poměry  $E_1/E_2 < 1$  dochází k nárůstu absolutní hodnoty  $T$ -napětí což je zejména patrné u delších trhlin.



**obr. 12** Vliv materiálového rozhraní na hodnoty  $T$ -napětí při konstantním zatížení  $K_I=10 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Vzdálenost sledovaného kořene od rozhraní byla  $\delta=1 \text{ mm}$ .

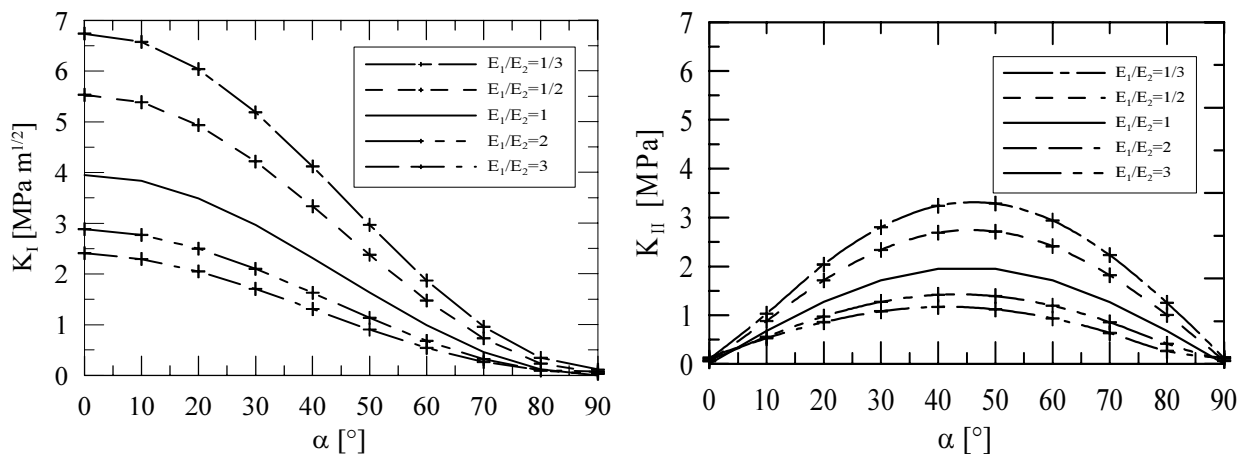
Dále jsou presentovány výsledky pro model zatížený konstantním silovým namáháním  $\sigma_{\text{appl}} = 100 \text{ MPa}$ . Na obr. 13 je znázorněna průběh hodnoty součinitele intenzity napětí pro trhlinu v blízkosti bi-materiálového rozhraní přičemž délka trhliny  $2a$  se mění od 1 do 20 mm a vzdálenost sledovaného kořene je stále stejná  $\delta = 1 \text{ mm}$ . Vlivem rozhraní dochází ke změně hodnot součinitele intenzity napětí  $K$  v závislosti na změně materiálu, přičemž je vidět, že pro trhliny blízké se nulové délce hodnoty součinitele intenzity napětí se blíží taktéž nule viz výsledky výpočtů na obr. 13 .



**obr. 13** Průběhy součinitele intenzity napětí  $K$  a  $T$ -napětí ovlivněné existencí materiálového rozhraní v závislosti na délce trhliny při zatížení  $\sigma_{\text{appl}}=100 \text{ MPa}$ . Vzdálenost sledovaného kořene od rozhraní byla  $\delta=1 \text{ mm}$ .

Na obr. 13 je pro již zmíněný případ namáhání vynesena průběh hodnot druhého parametru  $T$ -napětí. Vlivem rozhraní dochází k nárůstu či poklesu hodnoty  $T$ -napětí v závislosti na poměru Youngových modulů. Čím delší je trhlina tím je i vyšší rozdíl

hodnot T-napětí pro trhlinu v homogenním prostředí a trhlinu ovlivněnou materiálovým rozhraním. Dá se tedy říct, že hodnota T-napětí je v důsledku existence rozhraní ovlivněna a vliv je větší pro delší trhliny.



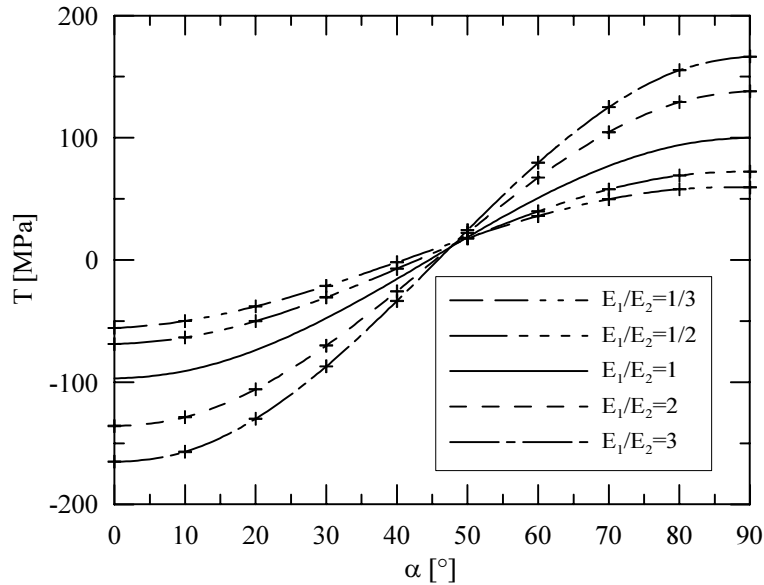
**obr. 14** Závislost hodnot součinitele intenzity napětí pro normálový mód  $K_I$  a pro smykový mód  $K_{II}$  na orientaci krátké trhliny vzhledem k materiálovému rozhraní. Hodnota aplikovaného napětí  $\sigma_{appl} = 100$  MPa. Vzdálenost sledovaného kořene od rozhraní byla  $\delta = 1$  mm.

Následující sledovanou problematikou v této části výpočtů bylo odhadnout velikost constraintu (charakterizovaného hodnotou T-napětí) pro krátké únavové trhliny mikrostrukturálního typu v závislosti na poloze a orientaci trhliny vzhledem k materiálovému rozhraní, zatížené konstantním silovým namáháním ( $\sigma_{appl} = 100$  MPa). Délka trhliny byla konstantní pro všechny uvedené konfigurace  $2a = 1$  mm a vzdálenost bližšího vrcholu trhliny od materiálového rozhraní byla stále stejná  $\delta = 1$  mm viz obr. 6. Úhel  $\alpha$  definující orientaci trhliny vzhledem k hranici zrna byl měněn od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  s přírůstkem  $10^\circ$ .

Na obr. 14 jsou znázorněny průběhy součinitelů intenzity napětí v závislosti na úhlu natočení  $\alpha$  vůči materiálovému rozhraní. V důsledku existence rozhraní hodnoty součinitelů intenzity napětí pro poměry Youngových modulů menší než 1 (menší než 1) jsou obecně větší (menší) než pro homogenní případ a mají stejný trend.

Z obr. 15 je patrná závislost hodnot T-napětí na orientaci trhliny a na poměru elastických konstant  $E_1/E_2$ . Je zřejmé, že v závislosti na natočení trhliny vzhledem k rozhraní lze rozlišit dva případy:

- vlivem existence rozhraní dojde obecně k poklesu absolutních hodnoty T-napětí a to pro případy kdy poměr  $E_1/E_2 < 1$
- vlivem existence rozhraní dojde obecně k nárůstu absolutní hodnoty T-napětí a to pro případy kdy poměr  $E_1/E_2 > 1$ .



**obr. 15** Závislost  $T$ -napětí na orientaci krátké trhliny vzhledem k materiálovému rozhraní. Hodnota aplikovaného napětí  $\sigma_{appl} = 100$  MPa. Vzdálenost sledovaného kořene od rozhraní byla  $\delta = 1$  mm.

### ***Elasto-plastická lomová mechanika-hodnoty lomových parametrů***

Kapitola se věnuje výpočtům lomově mechanických parametrů pro oblast elasto-plastické lomové mechaniky, kdy je chování trhliny charakterizováno v rámci dvouparametrové lomové mechaniky hodnotami J-integrálu a Q-parametru.

V první části jsou uvedeny výsledky pro případ, kdy trhlina se nalézá v nekonečně velkém homogenním tělese, v druhá část je pak zaměřena na výpočet hodnot parametrů J-integrálu a Q-parametru ovlivněné existencí specifického bi-materiálového rozhraní.

### **➤ Homogenní případ**

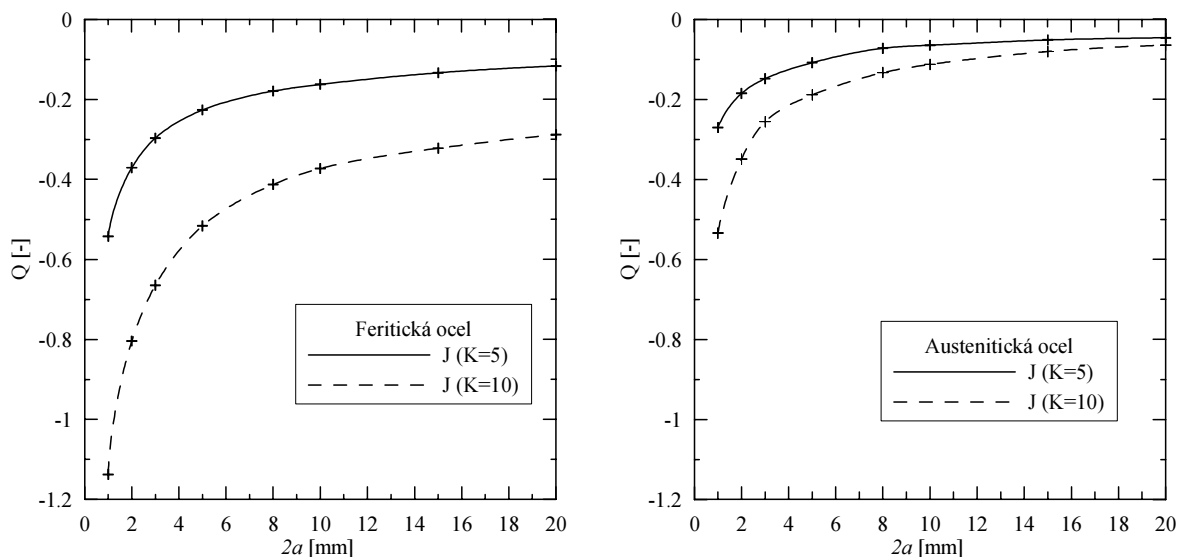
Hodnoty Q-parametru pro trhlina nacházející se v nekonečném homogenním tělese jsou studovány v závislosti na měnící se délce trhliny  $2a$  pro stejnou velikost hodnoty J-integrálu.

### **Materiály použité ke studiu:**

Pro studium byly materiály převzaty z [15]. Jedná se o dvě oceli, austenitickou a feritickou, které mají v podstatě stejné elastické vlastnosti, ale různé plastické chování. Cyklická mez kluzu  $\sigma_0$ , mez pevnosti v tahu  $\sigma_{TS}$ , deformace při lomu  $\varepsilon_f$  a exponent deformačního zpevnění  $n$ .

Austenická ocel:	$\sigma_0 = 360$ MPa	Feritická ocel:	$\sigma_0 = 240$ MPa
	$\sigma_{TS} = 640$ MPa		$\sigma_{TS} = 360$ MPa
	$\varepsilon_f = 55$ %		$\varepsilon_f = 35$ %
	$n = 0.2$		$n = 0.1$

Vezmeme-li v potaz cyklickou mez kluzu  $\sigma_0$  a exponent deformačního zpevnění  $n$ , lze označit austenitickou ocel jako plasticky silnější materiál zatímco feritická ocel reprezentuje plasticky slabší materiál.



**obr. 16** Závislost  $Q$ -parametru na délce trhliny  $2a$  pro konstantní zatížení udávající stejnou hodnotu  $J$ -integrálu.

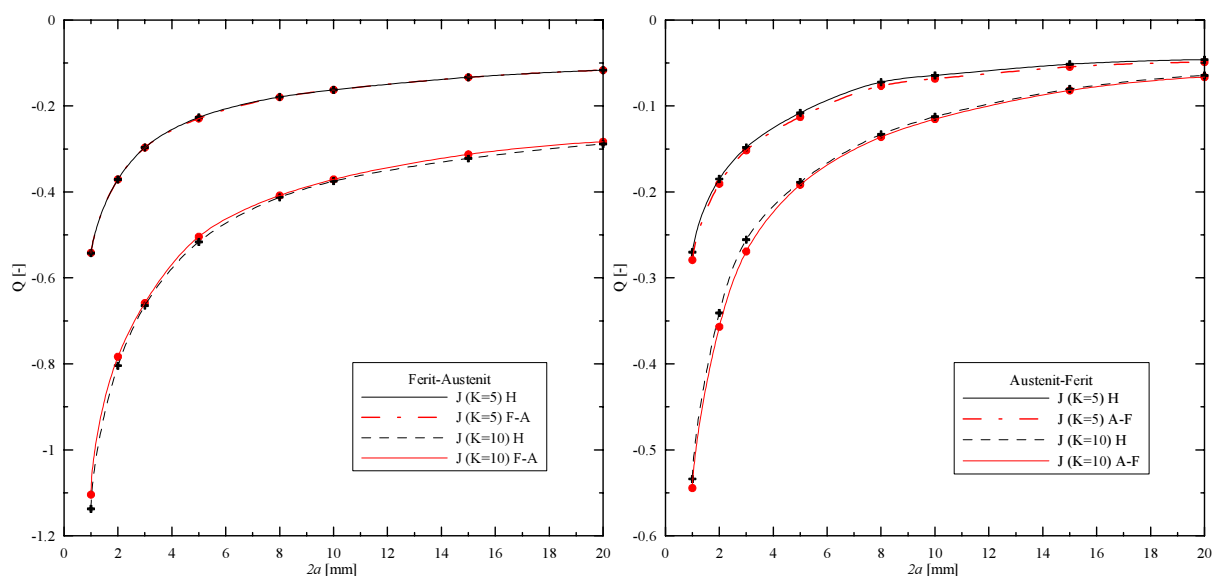
Zatížení je voleno tak, aby bylo dosaženo pro jednotlivé případy přibližně stejné hodnoty  $J$ -integrálu a to pro normálový mód namáhání  $J_I(K=5)=0.109$  a  $J_I(K=10)=0.44$  MPa m což jsou hodnoty, které odpovídají při použití elastickém homogenním materiálu zatížení součiniteli intenzity napětí  $K_I=5$  a  $10$  MPa m<sup>1/2</sup>.

Pro uvedené hodnoty  $J$ -integrálu na obr. 16 je znázorněn průběh hodnot  $Q$ -parametru pro trhlínu v nekonečně velkém homogenním tělese v závislosti na měnící se délce trhliny. Trend je podobný jako u  $T$ -napětí se zmenšující se délkou trhliny absolutní hodnoty  $Q$ -parametru narůstají (pro krátkou trhlínu roste tedy vliv constraintu). Srovnáním obou uvedených grafů (Austenitická a Feritická ocel) vidíme, že pro stejnou hodnotu  $J$ -integrálu je pro plasticky slabší materiál hodnota  $Q$ -parametru vyšší.

### ☛ Případy s materiálovým rozhraním

Problematika existence materiálového rozhraní se vyskytuje samozřejmě i u elasto plastických materiálů. V naší práci se zaměříme na trhliny v blízkosti specifické elasto-plastického rozhraní, kdy materiály mají obdobné elatické vlastnosti, ale různé plastické chování (Feritická a Austenitická ocel). Materiály jsou uvedeny v předchozím odstavci, kdy byly lomově mechanické parametry studovány pro trhlínu v homogenní prostředí.

Pro studium vlivu materiálového rozhraní byl použit model viz obr. 6 (přičemž rozměry byly ponechány stejné jako v případě lineárně elastickém), kde v prvním případě za materiál 1, ve kterém se nachází trhlína, byla použita feritická ocel (materiál plasticky slabší) a jako materiál 2 byla dosazena austenitická ocel (materiál plasticky silnější). Dosažené numerické výsledky jsou zobrazeny na obr. 17 vlevo, jedná se o hodnoty  $Q$ -parametru při zatížení odpovídající stejné hodnotě  $J$ -integrálu. U hodnota  $Q$ -parametru dochází k poklesu, což je zejména patrné pro  $J(K=10)$  F-A, ale obecně z uvedených hodnot nelze říci, že rozhraní má na dané hodnoty výrazný vliv, protože odchylky se pohybují v řádově do 5 % (což může odpovídat i numerickým chybám a vlivu konečnorozměrnosti numerického tělesa). Pro menší zatížení  $J(K=5)$  hodnoty  $Q$ -parametru téměř splývají.



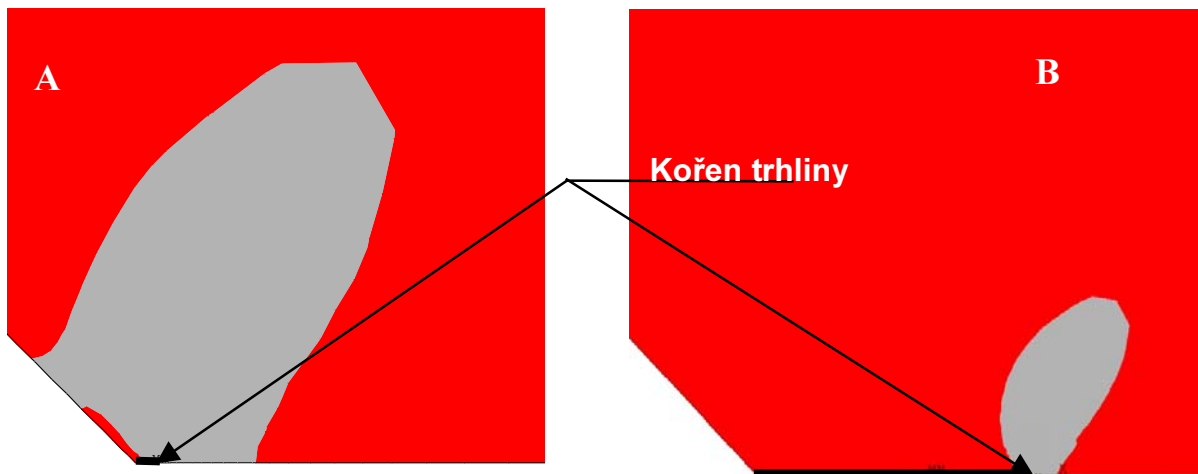
**obr. 17** *Q-parametr ovlivněný existencí bi-materiálového rozhraní (Ferit – Austenit, Austenit-Ferit) v závislosti na délce trhliny. Vzdálenost od rozhraní  $\delta=1$  mm.*

V druhém případě byla trhlina umístěna v austenitické oceli (materiál 1) a druhý materiál byla feritická ocel (materiál plasticky slabší). Na obr. 17 vpravo je zobrazen průběh hodnoty Q-parametru v závislosti na délce trhliny při zatížení odpovídající stejné hodnotě J-integrálu. Lze obdobně jako u předchozího případu konstatovat, že u hodnot Q-parametru došlo k nárůstu, což je v tomto případě patrné pro obě sledované hodnoty J-integrálu, ale obecně z uvedených hodnot nelze konstatovat, že rozhraní má na dané hodnoty výrazný vliv, protože odchylky se pohybují v řádově do 5 % (což může odpovídat i numerickým chybám a vlivu konečnorozměrnosti numerického tělesa).

### • Mechanicky krátká trhlina

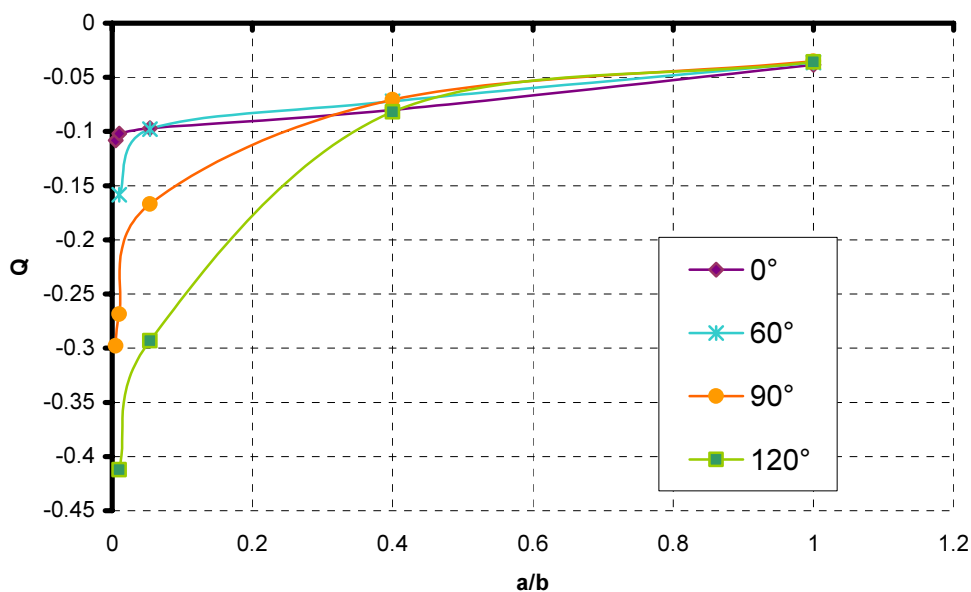
Dosažené numerické výsledky pro mechanicky krátké trhliny, jsou zde prezentovány na trhlínách, které jsou iniciované a rostoucí z kořene V-vrubu viz obr. 7 . Pro velmi krátké trhliny  $a/b \ll 1$ , takové které jsou celé pohlceny plastickou zónou V-vrubu, je třeba stanovit hodnotu Q-parametru. Příklad takové numerické analýzy je uveden na obr. 19 , kde jsou hodnoty Q-parametru uvedeny jako funkce úhlu otevření V-vrubu a poměru délka trhliny ku hloubce V-vrubu ( $a/b$ ). Na druhou stranu pro „delší“ krátké trhliny, kde  $a/b \sim 1$ , kořen trhliny se nachází mimo plastickou zónu V-vrubu, zde je T- napětí postačující k popisu vlivu constraintu na chování krátkých únavových trhlín viz obr. 18 . Vypočtené hodnoty T- napětí jsou zobrazeny na obr. 20



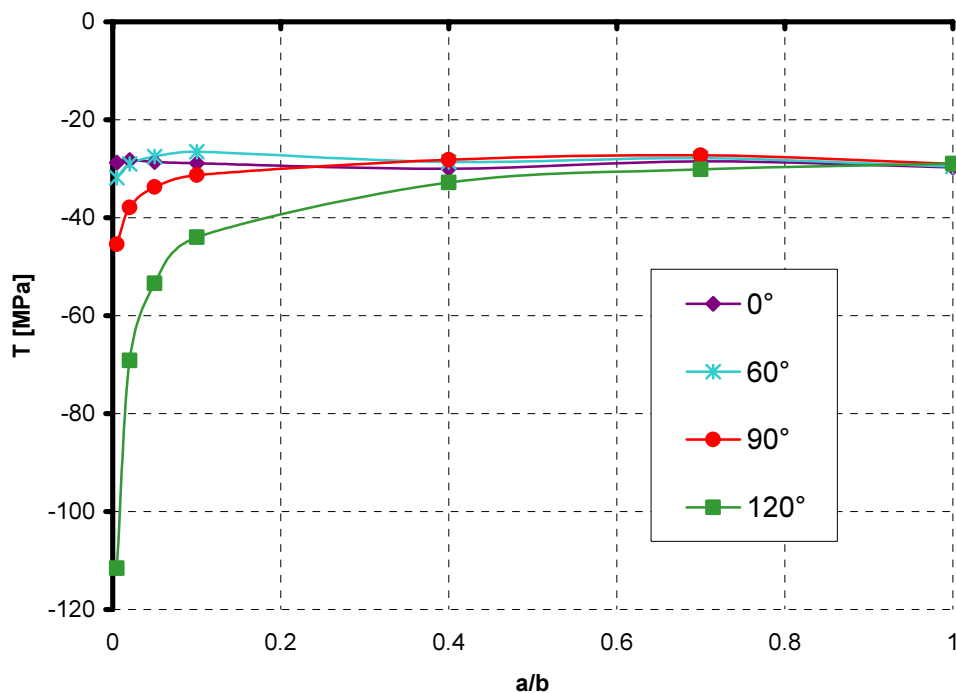


**obr. 18** A. Mechanicky krátká trhlina, která se celá nachází v plastické zóně V-vrubu. Příklad velmi krátké trhliny, kde  $a/b \ll 1$ . K charakterizaci constraint efektu použijeme  $Q$ -parametr B. Mechanicky krátká trhlina  $a/b \sim 1$ . Kořen trhliny se nachází mimo plastickou zónu V-vrubu. Pro popis vlivu constraintu na chování krátkých trhlín je adekvátní znalost  $T$ -napětí.

Vypočtené hodnoty pro oba případy mechanicky krátkých trhlín tj. pro  $a/b \ll 1$  a  $a/b \sim 1$ , viz obr. 19 ( $Q$ -parametr) a obr. 20 ( $T$ -napětí) a existence vztahu mezi  $T$ -napětím a  $Q$ -parametrem viz např. [16], indikuje možnost jednotného popisu vlivu constraintu na rychlost krátkých únavových trhlín založené na  $T$ -napětí. Záporná hodnota  $T$ -napětí pro krátké trhlíny iniciující se v kořeni V-vrubu předpokládá nárůst rychlosti šíření vlivem constraintu.



**obr. 19** Hodnoty  $Q$ -parametru odpovídající případu na obrázku obr. 18 A.



obr. 20 Průběh T-napětí odpovídající případu na obrázku obr. 18 B.

## 6 ZÁVĚR

Získané výsledky lze rozdělit na tři skupiny. První skupina se vztahuje na aplikace dvouparametrového popisu na šíření dlouhých únavových trhlin, kde jsme se navíc zaměřili na zpracování experimentálních výsledků získaných na ÚFM AV ČR během řešení sledované problematiky s cílem verifikovat navržený fenomenologický popis vlivu T-napětí na rychlost šíření únavových trhlin. Pozornost byla věnována i kombinovanému normálovému a smykovému módu namáhání. V druhé části jsme se zaměřili na modelování dvou typů krátkých únavových trhlin (mikrostrukturálně a mechanicky krátké trhliny) metodou konečných prvků a na výpočet jejich lomové mechanické parametrů. Poslední část je věnována možnostem aplikací dvouparametrové lomové mechaniky na uvedené typy krátkých trhlin a diskusi výsledků. Získané poznatky, rozdělené z tohoto hlediska, lze stručně shrnout do následujících závěrů:

### 6.1 OBLAST DLOUHÝCH ÚNAVOVÝCH TRHLIN

- Byly provedeny experimenty určující rychlost šíření únavových trhlin pro zkušební tělesa s obecně různou hodnotou T-napětí. Pro experimenty byly zvoleny vzorky se zápornou hodnotou T-napětí (CCT vzorek) a kladnou hodnotou T-napětí (CT vzorek).
- Byl navržen postup pro numerické zpracování výsledků experimentů se zahrnutím vlivu T-napětí. Postup byl aplikován na provedené výsledky a byla prokázána platnost navrženého modifikovaného Parisova-Erdoganova vztahu. Významným rysem uvedeného postupu je skutečnost, že nevyžaduje zavedení a měření žádných nových materiálových charakteristik a pro hodnocení vlivu constraintu na rychlost

šíření únavových trhlin jsou postačující známé charakteristiky (např. konstanty  $m$  a  $C$  Parisova-Erdoganova vztahu) určené pro jedinou hodnotu T-napětí (s výhodou pro  $T \geq 0$ ).

- Byl studován vliv T-napětí na velikost plastické zóny při kombinovaném namáhání za podmínky HMM.
- Byl studován vliv T-napětí na směr šíření únavové trhliny při kombinovaném namáhání normálovým a smykovým módem. Byly navrženy dvouparametrové modifikace kritérií určujících směr šíření trhliny v tomto případě. Výsledky byly diskutovány zejména s ohledem na velikost dodatečného parametru určující polohu, kde je kritérium aplikováno.
- Byla studována možnost aplikace dvouparametrového popisu směru šíření na případ únavových trhlin šířících se v prahové oblasti.
- Bylo provedeno odvození vlivu T-napětí na lomová kritéria při kombinovaném namáhání.

## 6.2 MODELOVÁNÍ KRÁTKÝCH ÚNAVOVÝCH TRHLIN A METODY VÝPOČTU LOMOVĚ-MECHANICKÝCH PARAMETRŮ

- Byl navržen model na bázi metody konečných prvků umožňující popis chování krátkých únavových trhlin mikrostrukturálního typu. Základem modelu je interakce krátké trhliny s hranicí zrna, která byla modelována jako rozhraní dvou různých materiálů.
- Mechanicky krátká únavová trhlina byla modelována jako trhlina šířící se v poli napětí  $V$ -vrubu a byly určeny lomově-mechanické parametry určující její chování v rámci dvouparametrového popisu.
- Pro numerický odhad hodnot lomově mechanických parametrů byly zpracovány přímé metody, které jsou založeny na srovnání numericky získaných hodnot určité veličiny s jejím analytickým vyjádřením a poukázáno na její výhody a úskalí. Pro srovnání a verifikaci výsledků výpočtů T-napětí byla použita i integrální metoda. Je ukázáno, že použití přímé metody dává dostatečně spolehlivé výsledky zejména v případech jednodušších konfigurací. V případě, kdy se trhlina nachází v poli s velkým gradientem napětí (např. v blízkosti rozhraní dvou materiálů) je vhodné použít pro výpočty obou metod.
- Byly studovány numerické postupy na bázi metody konečných prvků, které umožňují výpočet  $Q$ -parametru metodou modifikované okrajové vrstvy.

## 6.3 ZÍSKANÉ NUMERICKÉ VÝSLEDKY

### **V oblasti LELM:**

- Byly provedeny výpočty lomově-mechanických parametrů ( $K$ ,  $T$  resp.  $B$ ) pro mikrostrukturálně krátkou trhlinu nacházející se v blízkosti materiálové nehomogenity, které umožňují úplný dvouparametrový popis chování těchto trhlin.
- Byla provedena studie vlivu vnějšího zatížení a to jednak silovým a jednak deformačním namáháním se závěrem, že při silovém namáhání má bi-materiálové rozhraní znatelnější vliv na chování mikrostrukturálně krátké trhliny.
- Byly provedeny výpočty lomově mechanických parametrů pro trhlinu natáčeující se vůči bi-materiálovému rozhraní o úhel  $\alpha$  zatížené silovým namáháním.

### V oblasti EPLM:

- Byly provedeny elastoplastické výpočty pro trhliny nacházející se v nekonečném tělese pro dva různé elastoplastické materiály se stejnými elastickými vlastnostmi. Přičemž výpočty ukázaly, že u materiálu plasticky slabšího je při stejné hodnotě  $J$ -integrálu vliv constraintu vyšší.
- Byly provedeny výpočty lomové mechanických parametrů ( $J, Q$ ) pro mikrostrukturálně krátkou trhlinu nacházející se v blízkosti elastoplastického materiálové rozhraní zatížené silovým namáháním.
- Dosažené numerické výsledky pro mechanicky krátké trhliny, ukazují na nutnost použití  $Q$ -parametru pro dvouparametrový popis těchto trhlín pouze v případě, kdy se trhlina nachází v blízkosti vrubu, tj. v plastické zóně tímto koncentrátorem vyvolané. Pokud se kořen trhlíny nachází mimo tuto oblast, je pro dvouparametrový popis postačující analýza pomocí  $T$ -napětí. Odpovídající parametry byly stanoveny numericky na modelu trhlíny iniciované a rostoucí z kořene  $V$ -vrubu.

## 7 SHRNU TÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Získané výsledky umožňují posoudit vhodnost či nevhodnost dané geometrie tělesa pro prováděné zkoušky. Je ukázáno, že obecně je výhodné provádět experimenty se vzorky s kladnou příp. nulovou hodnotou  $T$ -napětí a zdůrazněna nutnost obezřetného postupu přenosu těchto hodnot na konstrukce se zápornou hodnotou  $T$ -napětí.

Byl vytvořen model umožňující dvouparametrový popis krátkých únavových trhlín, provedeny odpovídající výpočty a prezentována závislost  $T$ -napětí na poloze a orientaci trhlíny vzhledem k hranici zrna případně k lokálnímu koncentrátoru napětí. Výsledky poskytují dostatečný materiál pro kvantifikaci popisu sledovaných krátkých únavových trhlín v rámci lineární lomové mechaniky a to zejména v případech, kdy je tento popis možný na základě výsledků získaných pro dlouhé únavové trhliny. Další směr výzkumu by měl vzít v úvahu vliv constraintu na zavírání sledovaných trhlín a případně by měl sledovat detailněji chování residuální plastické zóny.

V případě krátkých únavových trhlín není vliv vnější geometrie a vnějšího namáhání charakterizovaný globálně pomocí  $K$  a  $T$  na jejich chování primární. Pro chování krátkých trhlín je rozhodující lokální rozdělení napětí a constraintu působící na trhlínu. Výsledky zdůrazňují lokální vliv constraintu, jež je v řadě případů rozhodující.

Navržený model mikrostrukturální (případně mechanicky) krátké únavové trhlíny, jejíž vlastnosti jsou především určeny interakcí s hranicí zrna (případně modelované pomocí  $V$ -vrubu) vystihuje dostatečně podstatu chování krátkých trhlín v rámci mechaniky kontinua.

Modelování krátkých trhlín zahrnující interakci s hranicí zrna umožňuje zahrnout do popisu jejich chování mikrostrukturu a zahrnutí efektu constraintu zvyšuje možnost jejich lomově-mechanického popisu

Vzhledem k závislosti lomově-mechanických parametrů (s důrazem na hodnoty  $T$ -napětí) na poloze a orientaci mikrostrukturálně krátké únavové trhlíny lze v souboru existujících krátkých trhlín vždy vybrat takovou (případně takové), která je z hlediska šíření nejvýhodněji položena a orientována. Tato trhlina (případně takové trhlíny) se začnou šířit při lokálních velikostech prahové hodnoty faktoru intenzity napětí, která sice může odpovídat  $K_{th}$  určené pomocí dlouhých trhlín, ale která je dosažena při vnějším

aplikovaném napětí, které odpovídá menší globální hodnotě faktoru intenzity napětí. Totéž pak platí i pro rychlost jejího šíření. Vzhledem k makro-popisu globálního pole napětí, se krátká trhlinka zdánlivě šíří při hodnotách nižších než  $K_{th}$  a rychlostí větší než by odpovídala hodnotě  $K$  určená z vnějšího namáhání a vnější geometrie tělesa. Výsledky práce ukazují, že vliv T-napětí popisující constraint v případech mikrostrukturálních krátkých únavových trhlin je pro jejich chování klíčový.

Podobné závěry platí i v případě mechanicky krátkých únavových trhlin, kde jsou lomově-mechanické parametry opět závislé na poloze a orientaci trhlin vzhledem k lokálním koncentrátorům napětí, které jsou v případě dlouhých trhlin obvykle zanedbány.

Výsledky získané při popisu dlouhých únavových trhlin tedy nelze bezprostředně aplikovat na krátké trhliny. V případě krátkých únavových trhlin lze předpokládat, že se budou šířit ty trhliny, které jsou nejvýhodněji situované a orientované vzhledem k mikrostrukturním jednotkám (např. k hranici sousedních zrn). Výsledky získané v této práci a dvouparametrový popis těchto trhlin umožňuje odhadnout tyto „nejvýhodněji“ orientované konfigurace, případně i kvantifikovat hodnoty lomově-mechanických parametrů, které jsou pro šíření krátké únavové trhliny rozhodující.

### **Výsledky obsažené v této práci byly dosaženy v rámci řešení grantů:**

GA AV ČR č. K2076106	„Role rozhraní dvou materiálů v lomové mechanice“
GA ČR č. 106/99/1173	„Aplikace dvouparametrové lomové mechaniky na šíření únavových trhlin“
GA ČR č. 106/01/0381	„Šíření únavových trhlin přes rozhraní dvou materiálů“
GA ČR č. 101/03/0331	Simulace šíření únavových trhlin ve složitých provozních podmínkách metodou konečných prvků“

## **8 VÝTAH Z POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Anderson, T. L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Second Edition, 1995, CRC Press.
- [2] *ANSYS Users Manual 5.0*. Swanson Analysis System, Houston, 1992.
- [3] Ayatollahi, M.R., Pavier, M.J., Smith, D.J. Determination of T-stress from finite element analysis for mode I and mixed mode I/II loading, *International Journal of Fracture*, Vol. 91, 1998, pp. 283-298
- [4] Bednář, K. Dvouparametrová lomová mechanika: výpočet parametrů a jejich význam při popisu chování únavových trhlin, *Disertační práce VUT v Brně*, 1999
- [5] Broek, D. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Academic Publishers, 1984
- [6] Henry, B., S., Luxmore, A., R. Three-dimensional evaluation of the T-stress in center cracked plates, *International Journal of Fracture*, Vol. 70, 1995, pp.35-50
- [7] Kněsl, Z., Bednář, K. Dvouparametrová lomová mechanika: Výpočet parametrů a jejich hodnoty, ÚFM AV ČR, Brno, 1998
- [8] Kněsl, Z., Bednář, K., Radon, J.C. Influence of T-stress on the rate of propagation of fatigue crack, *Physical Mesomechanics*, 2000, pp. 5-9
- [9] Kroupa, F. Lomová mechanika, *Československý časopis pro fyziku*, Sekce A, Svazek 28, číslo 2, pp. 101-123

- [10] Leever, P.S., Radon, J.C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries, *International Journal of Fracture*, Vol. 19, 1982, pp. 311-325
- [11] O'Dowd, N.P. Applications of Two parameter Approaches in Elastic-plastic Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 52, No. 3, 1995, pp. 445-465
- [12] Qian J., Fatemy A. Mixed mode fatigue crack growth: a literature survey, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55(6), 1996, pp. 969-990
- [13] Rice, J.,R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp. 379-386
- [14] Seitl, S. Dvoupřímětová lomová mechanika: chování krátkých únavových trhlin, *Pojednání ke státní doktorské zkoušce*, ÚMT na FSI VUT Brno, 2002
- [15] Sugimura, Y., Grondin, L., Suresh, S. Fatigue Crack Growth at Arbitrary Angles to Bimaterial Interface, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, No. 12, 1995, pp. 2007-2012
- [16] Suresh, S. *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, Cambridge 1998
- [17] Vecchio, R. S., Crompton, J.S., Hertzberg R.W. The influence of specimen geometry on near threshold fatigue crack growth, *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, Vol. 10, 1987, pp. 333-342
- [18] Williams, M. L. On the Stress Distribution at the Base of Stationary Crack, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, 1957, pp. 109-114
- [19] Yang, B., Ravi-Chandar, K. Evaluation of elastic T-stress by the stress difference method, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 64, 1999, pp. 589-605

## **9 SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU**

Příspěvky na konferencích (publikace ve sbornících konference)

- I. Náhlík, L., Seitl, S. Analýza rozdělení napětí pro trhlinu s vrcholem na rozhraní dvou materiálů, doktorandská konference „*Aplikovaná mechanika 2000*“, Liberec, 2000, pp. 305-310
- II. Seitl, S., Knésl, Z. Two Parameter Fracture Mechanics: Prediction of the Direction of Crack Growth, konference s mezinárodní účastí „*Engineering mechanics 2000*“, Svratka, Vol. 4, 2000, pp. 9-12, (in czech)
- III. Seitl, S., Bednář, K., Knésl, K. Výpočet T-napětí v případě mikrostrukturně krátkých únavových trhlin, konference s mezinárodní účastí „*Výpočtová mechanika 2000*“, Nečtiny, Vol. 2, 2000, pp. 381-388
- IV. Seitl, S. Výpočet T-napětí v případě mikrostrukturně krátkých únavových trhlin II, *Pedagogicko-vědecká konference*, Brno, 2000, pp. 287-290
- V. Seitl, S., Knésl, Z. Quantitative Assessment of the T-stress in Short Fatigue Crack Propagation, Konference s mezinárodní účastí „*Engineering Mechanics 2001*“, Svratka, 2001, na CD, (in czech)
- VI. Seitl, S., Hutař, P., Knésl, Z. Two-Parameter Approach for Short Cracks at Notches, *3<sup>rd</sup> International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture*, Brno, 2001, pp. 387-393, na CD
- VII. Seitl, S. Výpočet Q-parametru v případě mikrostrukturálně krátkých únavových trhlin, konference s mezinárodní účastí „*Výpočtová mechanika 2001*“, Nečtiny, Vol. 2, 2001, pp. 363–370,

- VIII. Seitl, S. Dvoupříměrový popis směru šířeni únavových trhlin při kombinovaném namáhání, *Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI–2001*, Brno 2001, na CD
- IX. Seitl, S. Vliv T-napětí na kritéria stability šířeni trhliny pro kombinovaný mód namáhání, Vědecké konference s mezinárodní účastí „*Aplikovaná mechanika 2002*“, Ostrava 2002, pp. 343-350
- X. Seitl, S. Vliv rozhraní dvou materiálů na interakci trhlin, Seminář „*Únava a lomová mechanika 2002*“, Metodické a aplikační problémy, Žinkovy 2002, pp.120-126
- XI. Seitl, S., Kněsl, Z. Analýza šířeni trhliny v okolí rozhraní dvou materiálů z hlediska dvoupříměrové lomové mechaniky, konference s mezinárodní účastí „*Engineering Mechanics 2002*“, Svratka, 2002, na CD
- XII. Seitl, S. Interakce dvou trhlin ovlivněná existencí bi-materiálového rozhraní, *Problémy lomové mechaniky II*, Brno, 19.června 2002, pp. 76-83
- XIII. Kněsl, Z., Seitl, S., Hutař, P. Accounting for effects of constraint on propagation of a fatigue crack, *Damage & Fracture Mechanics VII*, Computer Aided Assessment and Control, pp: 245-253
- XIV. Seitl S. Studium plastické zóny v rámci dvoupříměrové lomové mechaniky, 18. konference s mezinárodní účastí „*Výpočtová mechanika 2002*“, Nečtiny, 2002, pp. 423-430
- XV. Seitl S. Vliv bi-materiálového rozhraní na chování trhliny v CT-vzorku, *Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI–2002*, Brno 2002, na CD
- XVI. Seitl, S. Two Parameter Description of CT-specimen with Bi-material Interface, The Conference „*Applied Mechanics 2003*“, Jaworzynka, 2003, (in english)
- XVII. Seitl, S., Kněsl, Z. Two-parameter Description of Cracks in the Vicinity of inhomogeneity, konference s mezinárodní účastí „*Engineering Mechanics 2003*“, Svratka, 2003, na CD, No. 239, (in czech)
- XVIII. Klusák, J., Seitl, S., Hutař, P. Náhlík, L., Kněsl, Z. Comparison of Fracture Behavior of a Crack and General Singular Stress Concentrators, konference s mezinárodní účastí „*Engineering Mechanics 2003*“, Svratka, 2003, na CD, No. 238, (in czech)
- XIX. Seitl, S. Odhad směru šířeni únavové trhliny v prahové oblasti pomocí dvoupříměrové lomové mechaniky, *Problémy lomové mechaniky III*, Brno 11.června 2003, pp. 68-74
- XX. Hutař, P., Seitl, S., Kněsl, Z. Quantification of the effect of specimen geometry on the fatigue crack growth response by two-parameter fracture mechanics, *13th International Conference on the Strength of Materials Fundamental Aspects of the Deformation and Fracture of Materials*, Budapest, Hungary, 2003
- Přednášky
- XXI. Seitl, S. Vliv T-napětí na směr šířeni únavové trhliny, *Lomová mechanika a její aplikace* (nepublikovaná přednáška), Brno 2001
- XXII. Kněsl Z., Hutař P., Seitl S. Výpočet faktoru intenzity napětí metodou konečných prvků, *Výpočty konstrukcí metodou konečných prvků 2002*, vyžádaná přednáška, Praha, 2002, pp. 69-80
- Pojednání ke státní doktorské zkoušce
- XXIII. Seitl, S. Dvoupříměrová lomová mechanika: chování krátkých únavových trhlin, *Pojednání ke státní doktorské zkoušce*, ÚMT na FSI VUT Brno, březen 2002

## 10 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Ing. Stanislav Seitl  
Ústav fyziky materiálů  
Akademie věd České republiky  
Žižkova 22  
616 62 Brno

Tel: +420 532 290 351  
E-mail: seitl@ipm.cz



### Vzdělání

1999-2002	Postgraduální doktorské studium	Vysoké učení technické Brno Fakulta strojního inženýrství Ústav mechaniky těles Specializace: Inženýrská mechanika Pracoviště: Ústav fyziky materiálů AV ČR
1998-1999	Základní vojenská služba	VÚ Bohuslavice nad Vlčí Specializace: Chemický zbrojář
1993-1998	Vysoká škola	Vysoké učení technické Brno Fakulta strojního inženýrství Specializace: Učitelství matematiky a technické mechaniky pro střední školy
1989 – 1993	Střední škola	Střední průmyslová škola Přerov, Havlíčková 22

### Pracovní zkušenosti

1999 do současnosti	Ústav fyziky materiálů AV ČR, Brno	Dvoupřímá lomová mechanika 22 odborných článků. Spolupráce na grantech GA ČR.
1999 do současnosti	Fakulta strojního inženýrství VUT Brno	Vedení cvičení z Pružnosti a pevnosti I

### Ocenění

2003	První místo v soutěži o Cenu generálního ředitele Žďas, a.s. na konferenci Inženýrská mechanika 2003
------	--