

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles

Ing. Pavel Hutař

**DVOUPARAMETROVÝ POPIS MALÝCH TRHLIN
OVLIVNĚNÝCH POLEM NAPĚTÍ OBECNÝCH
KONCENTRÁTORŮ**

TWO-PARAMETER DESCRIPTION OF SHORT CRACKS
NEAR STRESS CONCENTRATORS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika

Školitel: prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Otakar Bokůvka, CSc.
Ing. Jana Horníková, Ph.D.
Ing. Karel Bednář, Ph.D.

Datum obhajoby: 24. 2. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

Šíření únavových trhlin, dvouparametrová lomová mechanika, constraint, T-napětí, malé trhliny, koncentrátor napětí.

KEY WORDS

Fatigue crack growth rate, two-parameter fracture mechanics, constraint, T-stress, stress concentrator.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu
Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

OBSAH

1	ÚVOD.....	5
2	CÍLE PRÁCE	5
3	MODEL MALÉ TRHLINY OVLIVNĚNÉ KONCENTRÁTOREM.....	6
4	VÝPOČET LOMOVÝCH PARAMETRŮ.....	8
5	DVOUPARAMETROVÝ POPIS RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY	8
5.1	Zahrnutí constraintu do popisu únavové trhliny	8
5.2	Experimentální výsledky	10
5.3	Vyhodnocení experimentu s uvážením vlivu constraintu	11
6	VYBRANÉ VÝSLEDKY Z OBLASTI TRHLIN OVLIVNĚNÝCH VRUBY	12
6.1	Trhlina šířící se z vrubu.....	12
6.2	Trhlina ovlivněná blízkostí vrubu	14
6.3	Kvantifikace vlivu constraintu na rychlost šíření malé trhliny	16
7	ZÁVĚR.....	18
8	SUMMARY	21
9	LITERATURA	22
10	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ	23
11	CURRICULUM VITAE	24

1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce se zabývá lomovou mechanikou. Tato oblast mechaniky se začala rozvíjet zejména po druhé světové válce, kdy narostla potřeba kvantifikovat vliv vad v materiálu na životnost součástí. Příčinou bylo zejména rozšíření technologie svařování na velké konstrukční celky a z toho plynoucí častější poškození způsobené křehkým lomem. Lomová mechanika popisuje trhlinu popř. jiný defekt tak, aby bylo možno s její pomocí kvantifikovat životnost konstrukce obsahující vadu a zajistit tak bezpečnější provoz těchto celků. Vzhledem k tomu, že jakýkoli materiál v sobě defekty ve větší či menší míře obsahuje, je lomová mechanika nezbytným nástrojem při návrhu všech složitějších celků.

Těžištěm této práce je kvantifikovat vliv constraintu na chování malých trhlin vyskytujících se v poli napětí jiných koncentrátorů. Koncentrátorem napětí můžeme rozumět vrub nebo obecně vadu v materiálu. Koncentrátory napětí mohou mít podobně jako trhlina singulární charakter (typickým singulárním koncentrátorem je ostrý V-vrub) a nebo nesingulární charakter (např. U-vrub). Malá trhlina je v této práci definována jako fyzikálně nebo mechanicky krátká únavová trhlina ovlivněná polem napětí uvažovaného koncentrátoru. Tato problematika je významná a aktuální, protože většina trhlin se iniciuje z koncentrátorů napětí nebo v jejich okolí. Jejich chování může být tímto koncentrátorem ovlivněno rozhodujícím způsobem. Proto zpřesnění popisu takových trhlin může významně přispět k zkvalitnění odhadu životnosti konstrukcí a k zvýšení spolehlivosti jejich provozu.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je uvážit vliv constraintu na chování malých trhlin ovlivněných polem napětí obecných koncentrátorů napětí ve smyslu definovaném v úvodu. Koncentrátory napětí lze rozdělit do dvou skupin, a to na singulární a nesingulární. Singulární koncentrátory obsahují singularitu napětí typu $1/r^p$, kde r je vzdálenost od kořene koncentrátoru a p je z intervalu hodnot $(0;1)$. Typickým zástupcem singulárních koncentrátorů je ostrý V-vrub, kde se singularita mění s úhlem otevření vrubu. Jako příklady nesingulárních koncentrátorů uveďme konstrukční prvky jako jsou otvory, vruby s konečným poloměrem v kořeni nebo materiálové vady různého typu a tvaru. Uplatnění takového popisu je tedy poměrně široké.

V literatuře je řešena popsána problematika většinou pouze pomocí jednoparametrového přístupu, neuvažuje se tedy vliv constraintu. V případech, kdy je trhlina ovlivněna polem napětí jiného koncentrátoru, dochází k poměrně velké ztrátě constraintu, což může nepříznivě ovlivnit životnost součásti s trhlinou. Z tohoto důvodu v této práci aplikujeme na problémy trhlin ovlivněných koncentrátorem dvouparametrový popis, který je schopen tyto jevy postihnout. V oblasti aplikace dvouparametrového přístupu navážeme jak na znalosti publikované v literatuře, tak i na naše vlastní výsledky, které se zabývají vlivem

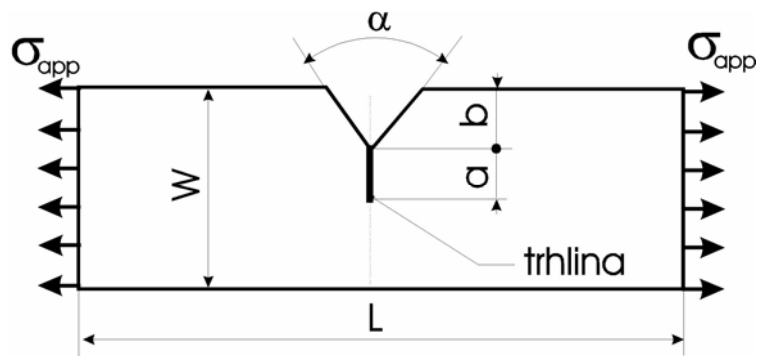
constraintu na rychlost šíření únavových trhlin. Na základě literárního rozboru problematiky a výše uvedených úvah byly cíle formulovány takto:

- Vybrat vhodné parametry charakterizující constraint, porovnat mezi sebou jejich použitelnost a doporučit ty nejvhodnější pro řešení studovaného problému. V tomto bodě jde zejména o porovnání parametrů T-napětí a Q-parametru. Na základě vlastních zkušeností a literárních pramenů diskutovat možnosti a vhodnost jejich použití.
- U takto vybraných parametrů porovnat metody jejich numerického stanovení, zvážit výhody a nevýhody jednotlivých postupů a doporučit metody vhodné pro řešení sledovaných úloh.
- Vytvořit relevantní numerické modely trhlin ovlivněných polem napětí různých koncentrátorů pomocí metody konečných prvků (MKP) a stanovit potřebné lomové parametry. Zde je třeba diskutovat nutnost řešení úlohy jako trojrozměrné, najít hranice elastického popisu materiálových charakteristik a v neposlední řadě vytvořit MKP model odpovídající geometrie a okrajových podmínek.
- Na základě vypočtených lomových parametrů rozhodnout o chování únavových trhlin. Do klasického popisu únavové trhliny zahrnout vliv constraintu a navrženou metodiku ověřit vlastními cílenými experimenty.
- S pomocí dosažených výsledků vyslovit globální závěry týkající se vlivu constraintu na rychlost šíření trhliny v blízkosti obecného koncentrátoru napětí a navrhnout tak obecnou metodiku řešení dané problematiky pro praktické aplikace.

3 MODEL MALÉ TRHLINY OVLIVNĚNÉ KONCENTRÁTOREM

Koncentrátory napětí, které se v praxi vyskytují, jsou velice často podobné vrubům, a proto jako model obecného koncentrátoru napětí byly zvoleny právě vruby. Byly zkoumány jak vruby ostré, tak vruby s určitým poloměrem zaoblení. První skupina reprezentuje singulární koncentrátory napětí, druhá nesingulární. Poznamenejme, že změnou geometrie vrubů (zejména poloměru zaoblení a úhlu otevření V-vrubu) lze dosáhnout změny v rozdělení napětí v okolí jejich vrcholu a tím modelovat chování celé řady existujících koncentrátorů napětí.

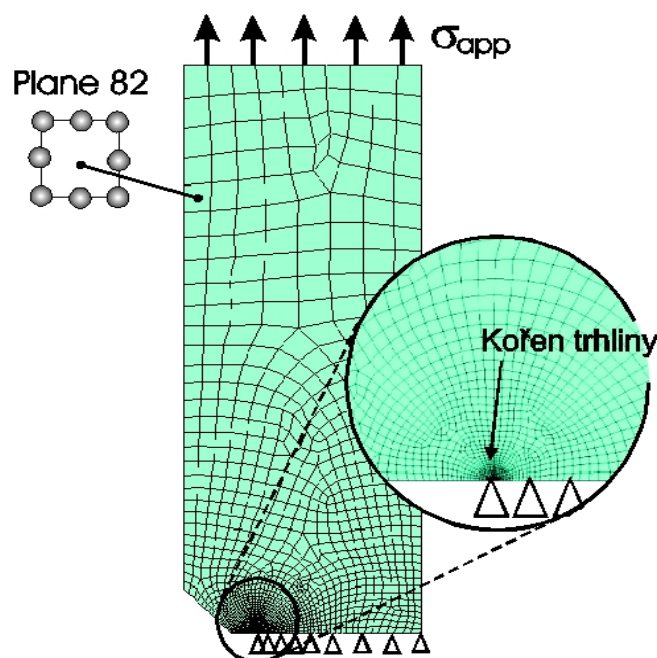
Jako model tělesa pro studium řešené problematiky byl použit tažený pás s bočním vrubem v jehož blízkosti je trhlina, viz obr.1. Tento vzorek má jednoduchou geometrii, lze na něm postihnout všechny zkoumané jevy a je vhodný i pro eventuální budoucí experimentální ověření.



Obr. 1 Model vzorku s V-vrubem

Vnější geometrie vzorku je pro všechny úvahy a analýzy stejná, mění se pouze geometrie koncentrátoru napětí (V-vrub, U-vrub), poloha trhliny a její velikost. Tato skutečnost umožňuje sledovat změnu constraintu vyvolanou pouze interakcí trhlina - vrub a tak popsat obecně jejich ovlivnění.

Veškeré výpočty byly provedeny pomocí metody konečných prvků s využitím komerčního systému ANSYS. Vzorek na obr.1 byl modelován ve dvourozměrné i třírozměrné variantě. Z hlediska určení lomových parametrů trojrozměrný model s rovným čelem trhliny nepřináší žádné kvalitativní zlepšení proti 2D modelu. Proto byl zvolen jako postačující pro tuto analýzu 2D model na obr.2.



Obr. 2 Použitá síť MKP

V souladu s metodikou výpočtů MKP je síť konečných prvků koncipována tak, aby nejmenší prvky byly v oblastech největších gradientů napětí tj. u kořenů trhliny a vrubu. Pro úlohy v elastické oblasti byly u kořene trhliny použity prvky s posunu-

tými středovými uzly, které lépe vystihují singularitu napětí typu trhlina $(1/r^{1/2})$. U případů kde to bylo možné, byla využita symetrie geometrie i okrajových podmínek ke snížení počtu použitých prvků. V okolí kořene trhliny bylo použito 30 vrstev konečných prvků ležících na soustředných kružnicích se středem v kořeni. Velikost nejmenšího elementu byla v poměru k délce trhliny $\delta_{\min}/a \cong 0,005$.

4 VÝPOČET LOMOVÝCH PARAMETRŮ

Abychom mohli usuzovat na chování dané trhliny, je nejprve nutno na zvoleném modelu stanovit velikosti lomových parametrů. Protože se zabýváme zejména vysokocyklovou únavou, použili jsme lineární elastickou lomovou mechaniku. Určovala se tedy hodnota faktoru intenzity napětí K a constraint byl charakterizován T-napětím. Velikost faktoru intenzity napětí byla stanovena pomocí metody posunutých uzlových bodů, která je dobře dokumentována, ověřena a poskytuje výsledky s postačující přesností např. [1],[5],[13]. Pro výpočet T-napětí byla použita metoda M-integrálu. Diskuse o vhodnosti použitých metod výpočtu T-napětí lze nalézt např. v [8], [10], [17], [18].

5 DVOUPARAMETROVÝ POPIS RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

5.1 ZAHRNUTÍ CONSTRAINTU DO POPISU ÚNAVOVÉ TRHLINY

V průběhu cyklického zatěžování se tvoří před rostoucí trhlinou cyklická plastická zóna. Její velikost a další parametry ovlivňují chování trhliny, např. [4]. Klasický fenomenologický popis rychlosti šíření trhliny závisí pouze na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí a křivka da/dN vs. ΔK je materiálovou charakteristikou. To je ale v rozporu s některými experimenty např. [19], [20]. Proto Knésl, Bednář a Radon ve svých pracích [3], [14] ukázali postup jak popsat únavovou trhlinu pomocí velikosti plochy plastické zóny, a to tak, že modifikovali původní Parisův a Erdoganův popis pomocí dvouparametrové lomové mechaniky.

Tento postup modifikuje hodnotu faktoru intenzity napětí a definuje efektivní faktor intenzity napětí, K_{eff} , který v sobě již zahrnuje vliv constraintu. Přepočtení mezi faktorem intenzity napětí a K_{eff} je provedeno na základě velikosti plochy plastické zóny. V rámci lineární lomové mechaniky existuje jednoznačná relace mezi plochou plastické zóny S_p a hodnotou faktoru intenzity napětí. Platí $S_p \approx (K_I/\sigma_0)^4$, kde σ_0 je mez kluzu studovaného materiálu. V literatuře existují vyjádření pro rychlost šíření únavové trhliny ve tvaru $da/dN \approx S_p^{m/4}$ a toto vyjádření je v rámci jednoparametrové lineární elastické lomové mechaniky ekvivalentní s klasickým Parisovým vztahem $da/dN = C(\Delta K)^m$. Pokud však velikost plastické zóny (při stejné hodnotě K_I) závisí na geometrii tělesa, musí být na geometrii závislá i rychlost šíření únavové trhliny. Nyní uvažme mívový cyklus ($R = 0$, a proto $\Delta K = K_I$) a označme plochu plastické zóny v závislosti na K_I a T jako $S_p = S_p(K_I, T)$. Pro

nulové T-napětí označme plochu plastické zóny $S_p^0 = S_p^0(K_I, T = 0)$ a stanovme vzájemný vztah mezi těmito dvěma veličinami ve tvaru:

$$S_p(K_I, T) = \lambda^4(T / \sigma_0) S_p^0(K_I, T = 0) \quad (1)$$

Velikosti plastických zón pro různou velikost constraintu určil Bednář ve své práci [3] pomocí metody konečných prvků. Materiálové vlastnosti byly modelovány pomocí Rambergova-Osgoodova vztahu mezi napětím a přetvořením. Výsledkem těchto numerických simulací je vztah:

$$\lambda(T / \sigma_0) = 1 - 0,85 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right)^3 + 0,52 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right)^2 - 0,30 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right) \quad (2)$$

$\lambda(T / \sigma_0)$ tedy závisí pouze na mezi kluzu daného materiálu σ_0 a na velikosti T-napětí. Vliv koeficientu zpevnění na tuto relaci se ukázal tak malý, že ho nemusíme brát v úvahu. Tuto funkci využijeme ke korekci faktoru intenzity napětí. Efektivní hodnotu faktoru intenzity napětí lze pak vyjádřit vztahem:

$$K_{eff} = \lambda(T / \sigma_0) K_I(T = 0) \quad (3)$$

Použijeme-li hodnotu K_{eff} jako veličinu řídící chování únavové trhliny a dosadíme-li ji do Parisova-Erdoganova vztahu popisujícího rychlost šíření trhliny, dostaneme vztah:

$$da / dN = C (K_{eff}(K_I, T))^m \quad (4)$$

Výhodou tohoto postupu je, že můžeme využít materiálové konstanty C a m , které jsou pro většinu materiálů známé a měřené většinou pro $T \geq 0$. Potom křivka da/dN vs. K_{eff} je nezávislá na geometrii tělesa. U kovových materiálů je záporné T-napětí spojeno s růstem plastické zóny, a proto lze říci, že platí tyto relace: $da / dN(K_I, T < 0) > da / dN(K_I, T = 0) > da / dN(K_I, T > 0)$. Pro stejnou hodnotu faktoru intenzity napětí tedy s klesajícím T-napětím roste rychlost šíření únavové trhliny. Tento závěr odpovídá experimentálním výsledkům.

Podobně jako Parisovu rovnici lze modifikovat i podmínku pro šíření trhliny v oblasti prahových hodnot:

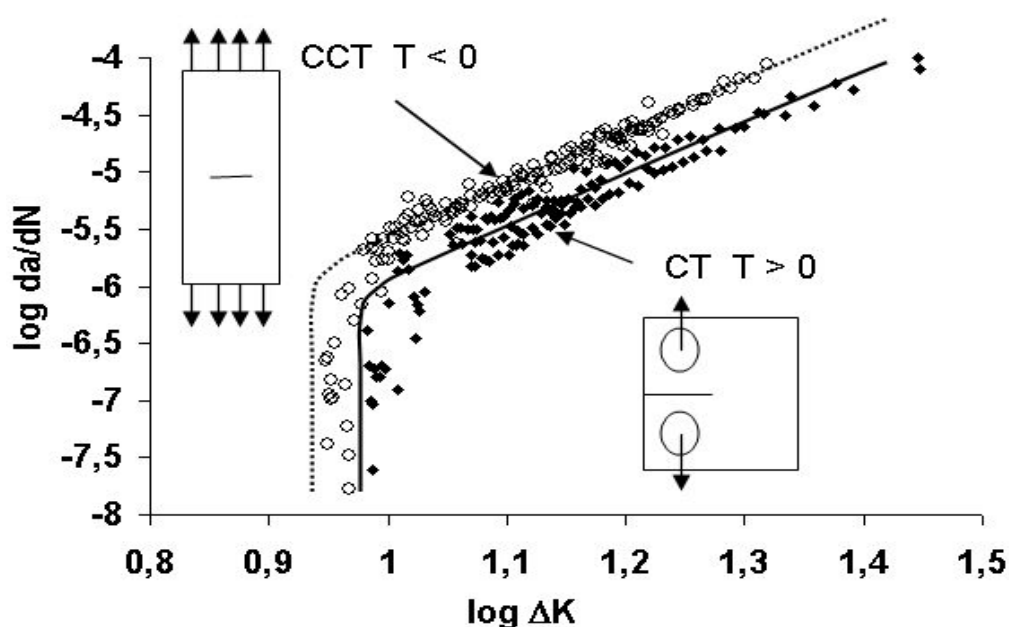
$$K_I < K_{th} / \lambda(T / \sigma_0) \quad (5)$$

Tento přístup umožňuje přesnější přenos dat mezi zkušební vzorkem a konstrukcí s různou geometrií a pomáhá tak zkvalitnit odhad únavové životnosti konstrukčních celků.

5.2 EXPERIMETÁLNÍ VÝSLEDKY

Na ÚFM se začaly testovat vzorky s rozdílnou vnější geometrií s cílem potvrdit nebo vyvrátit možný popis navržený pro zahrnutí constraintu do únavového šíření popsany v předchozí kapitole. V rámci této disertace se experimenty, na rozdíl od práce [16], zaměřovaly zejména na oblast prahových hodnot. Testovaly se dva typy vzorků, CT-vzorek (vzorek pro excentrický tah) a CCT-vzorek (vzorek s centrální trhlinou). Vzhledem k tomu, že tyto dva vzorky se vyznačují velkým rozdílem v hodnotách constraintu, jsou pro tento druh experimentu vhodné. Trhlina v CT-vzorku je vždy popsána kladnou hodnotou T-napětí. CCT vzorek má T-napětí záporné po jakoukoli délku trhliny. Při porovnání vzorků těchto geometrií by se měly sledované skutečnosti nejvíce projevit.

Oba vzorky byly vyrobeny ze stejného materiálu ocel 12 050.1. Je to uhlíková ocel o materiálovém složení: C(0,42-0,5)%, Mn(0,5-0,8)%, Si(0,17-0,37)%, Cr(0,25)%, Ni(0,3)%, max. P(0,04)%, max. S(0,04)%. Její materiálové charakteristiky jsou: cyklická mez kluzu $\sigma_0=202\text{MPa}$ a koeficient zpevnění $n=0.3$. Všechny experimenty byly provedeny za stejných laboratorních podmínek při teplotě okolí 25°C . Parametr asymetrie byl zvolen tak, aby se co nejvíce blížil mívivému cyklu, tj. $R=0$, a tedy $\Delta K_I=K_I$. Z technických důvodů nelze vzorek úplně odlehčit, proto byl zvolen koeficient asymetrie $R=0,1$.



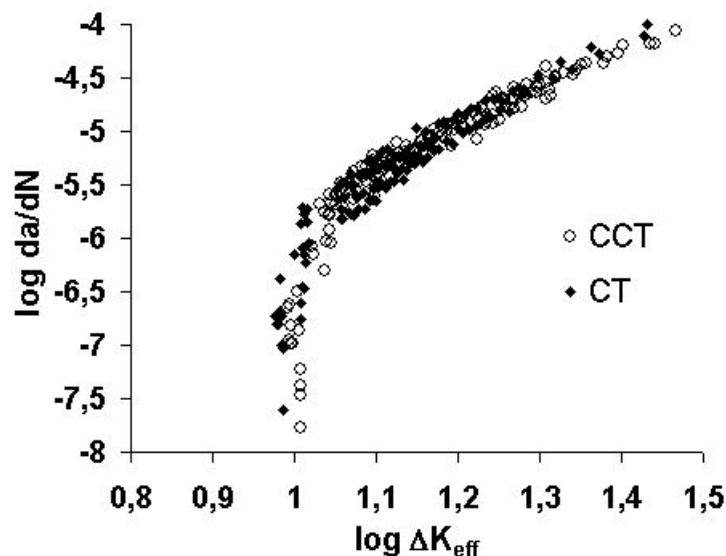
Obr. 3 Vliv geometrie tělesa na rychlost šíření únavové trhliny

Experimenty byly provedeny na rezonančních pulsátorech pro vysokocyklovou únavu Roell Amsler HFP 5100 a Shenck PVQO. Tyto stroje vykazovaly při měření frekvenci kolem 60 Hz. Frekvence se s růstem trhliny měnila v jednotkách, a proto její vliv na experimentální výsledky je zanedbatelný. Experimentální data byla dále zpracována podle normy [2]. Výsledek je uveden na obr.3. Jak je patrné pro CT vzorek charakterizovaný kladným T-napětím (tj. ekvivalentně kladným faktorem biaxiality), jsou pro stejnou velikost faktoru intenzity napětí nižší rychlosti šíření než je tomu u CCT vzorku ($T < 0$). To je plně v souladu s výsledky experimentů v práci [20]. Stejným způsobem se chovají i prahové hodnoty faktoru intenzity napětí. CCT vzorek má prahové hodnoty výrazně nižší než CT vzorek, a tedy celá křivka ΔK - da/dN je odlišná. Tyto dva vzorky mají různé materiálové křivky, což neodpovídá představám podporovaným jednoparametrovým popisem. Materiálové charakteristiky popisující lineární část této křivky jsou pro CCT vzorek: $C=6,607 \cdot 10^{-11}$ a $m=4,609$. CT vzorek má tyto konstanty $C=2,883 \cdot 10^{-10}$ a $m=3,662$. Pro ilustraci rozdílnosti těchto hodnot uveďme, že pro hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí $\Delta K=15 \text{ MPa m}^{1/2}$ je rychlost šíření da/dN určená pro CT vzorek pouze 33% rychlosti stanovené pro CCT vzorek. Rozdíly v naměřených prahových hodnotách jsou taky poměrně značné: prahová hodnota faktoru intenzity napětí pro CT vzorek je $K_{th}=9,66 \text{ MPa m}^{1/2}$ a pro CCT vzorek $K_{th}=8,81 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Podíváme-li se na tyto výsledky z hlediska studovaného problému, tj. rychlosti šíření trhliny v blízkosti koncentrátoru napětí, vliv constraintu v těchto případech bude poměrně velký. Z toho plyne, že se trhlina může šířit až dvakrát rychleji než předpokládá jednoparametrový popis. Je tedy pro studium těchto problémů důležité kvantifikovat rozdíly v úrovni constraintu uvedené v předchozím textu a zahrnout je do popisu únavového chování trhlín. Protože studujeme malé trhliny, je pro nás důležitá zejména oblast prahových hodnot faktoru intenzity napětí, na kterou se v dalším soustředíme.

5.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU S UVÁŽENÍM VLIVU CONSTRAINTU

Pokud aplikujeme korekci na constraint popsanou v kap.5.1 na získané experimentální výsledky, dostaneme závislost uvedenou na obr.4. Všechny naměřené hodnoty tak splynou do jednoho pásu daného chybou měření. Navržený postup lze aplikovat na celou oblast naměřených dat. Je platný jak v oblasti prahových hodnot, tak i v oblasti platnosti Parisova-Erdoganova vztahu. Dostáváme pouze jednu materiálovou křivku pro nulovou hodnotu T-napětí a křivky da/dN vs ΔK_I získané pro různé hodnoty constraintu lze vzájemně přepočítávat. Parametry charakterizující oblast stabilního šíření trhliny pro $T=0$ pak v případě studované oceli jsou: $C=1,473 \cdot 10^{-10}$ a $m=4,0128$. Prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí je $K_{th}=9,44 \text{ MPa m}^{1/2}$. Je tedy vidět, že pro geometrie charakterizované ztrátou constraintu je použití dvouparametrového přístupu naprosto nezbytné.



Obr. 4 Experimentální data s uvážením constraintu

Z pohledu řešeného problému, tj. malá trhlina v blízkosti koncentrátoru napětí, je tento postup nezbytný, protože tyto konfigurace jsou na constraint velice citlivé. Důraz je kladen zejména na aplikaci v oblasti prahových hodnot, protože v blízkosti koncentrátorů se často trhliny iniciují a pohybují se v oblasti malých rychlostí šíření.

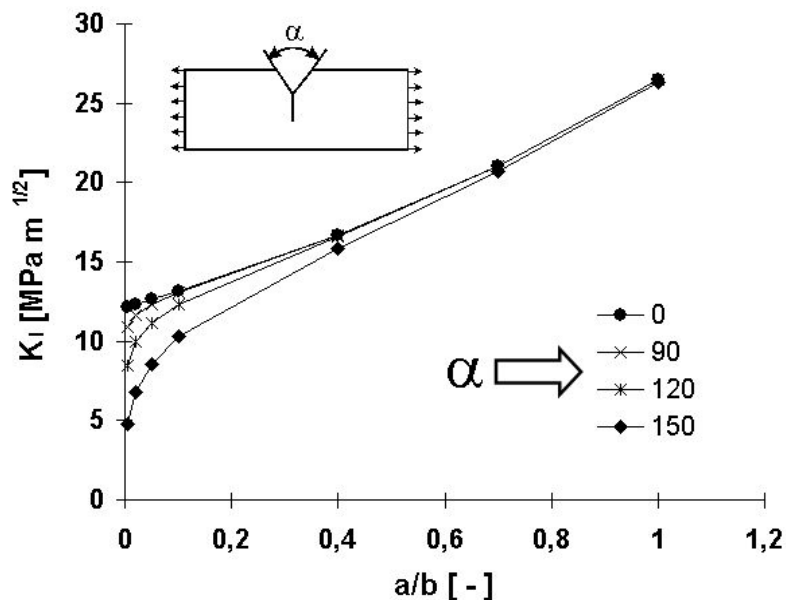
6 VYBRANÉ VÝSLEDKY Z OBLASTI TRHLIN OVLIVNĚNÝCH VRUBY

6.1 TRHLINA ŠÍŘÍCÍ SE Z VRUBU

První analyzovanou konfigurací je trhlina, která se šíří z vrubu [5], [7] a [9]. Zde byly sledovány dva případy: trhlina šířící se z ostrého V-vrubu a trhlina šířící se z U-vrubu. Vzorek s V-vrubem je uveden na obr.1. Rozměry tělesa byly $L=250$ mm, $W=50$ mm a hloubka vrubu $b=10$ mm. Trhlina je zatěžována módem I a velikost aplikovaného napětí je $\sigma_{app}=50$ MPa. Úhel otevření V-vrubu byl sledován v intervalu $\alpha=0-150^\circ$, poloměr zaoblení U-vrubu se měnil od 0 do 5 mm. Délka trhliny se mění od 0,05 do 10 mm.

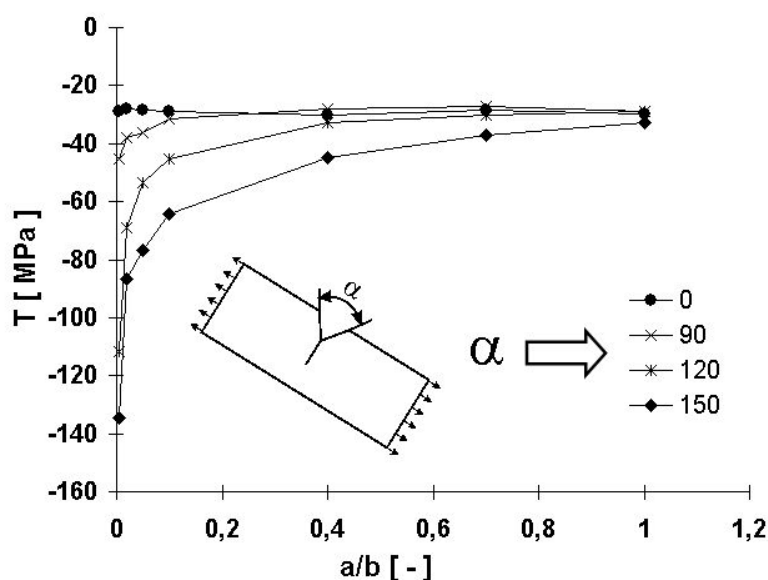
Hodnoty faktoru intenzity napětí byly stanoveny pro oba sledované vzorky pomocí metody posunutých uzlových bodů. Vliv úhlu otevření ostrého V-vrubu na hodnoty faktoru intenzity napětí pro trhlinu iniciovanou ve vrubu je uveden na obr.5. Hodnota úhlu otevření vrubu $\alpha=0^\circ$ odpovídá trhlině délky $a+b$. Se zvětšujícím se úhlem otevření vrubu α klesá exponent singularity p až k nulové hodnotě odpovídající úhlu otevření V-vrubu 180° . Pro malé úhly otevření vrubu je pokles exponentu singularity pozvolný a do úhlu asi 40° (odpovídá $p=0,470$) je chování vrubu prakticky stejné jako chování trhliny. Pro větší úhly otevření už dochází k prudkému poklesu exponentu singularity. To odpovídá výsledkům uvedeným v grafu 5. S rostoucím úhlem otevření vrubu α klesá hodnota faktoru intenzity napětí

trhliny iniciované z vrubu. Do úhlu $\alpha=90^\circ$ se hodnoty K_I neliší od hodnot pro $\alpha=0^\circ$ více než o 7 % ani pro nejkratší trhlinu délky $a=0,05$ mm. Pro velké úhly otevření vrubu přes 90° již dochází k silnějšímu poklesu hodnot K_I . Pro úhel 150° (odpovídá $p=0,248$) jsou hodnoty faktoru intenzity napětí pro trhlinu délky $a=0,05$ mm poloviční. Podobné výsledky lze nalézt např. v [6], [15].



Obr. 5 Vliv vrubu na hodnotu faktoru intenzity napětí v kořeni trhliny pro různé úhly otevření vrubu α

Ovlivnění faktoru intenzity napětí U-vrubem je podobné jako u V-vrubu. S rostoucím poloměrem zaoblení klesá hodnota faktoru intenzity napětí. Přejdeme nyní k popisu hodnot T-napětí v uvedených případech, kde je vliv vrubu výraznější než u hodnot faktoru intenzity napětí. Pro ostrý V-vrub je tato závislost na obrázku 6. Stejně jako je tomu u faktoru intenzity napětí, s rostoucím úhlem otevření vrubu α dochází k poklesu hodnot T-napětí. Pro úhly α do 60° tento pokles však není významný, činí max. 7%, což opět souvisí s malým poklesem exponentu singularity napětí p . Pro úhly otevření V vrubu větší než 90° je pokles T napětí již významný. Např. pro úhel 120° (odpovídá $p=0,384$) je T v absolutní hodnotě pro trhlinu délky $a=0,05$ mm trojnásobné. Pro stejnou délku trhliny a $\alpha=150^\circ$ je T-napětí čtyřnásobné ve srovnání s vrubem s nulovým úhlem otevření. Tak silný pokles constraintu může mít za následek výrazný vzrůst rychlosti šíření únavové trhliny, viz kap.5.2. Stejně závěry platí i pro T-napětí ovlivněné existencí U-vrubu. S rostoucím poloměrem U-vrubu ρ dochází k poklesu T-napětí. Pro poloměry $\rho>2$ mm a nejkratší trhlinu $a=0,2$ mm je tento pokles více než trojnásobný ve srovnání s trhlinou délky $b+a$.

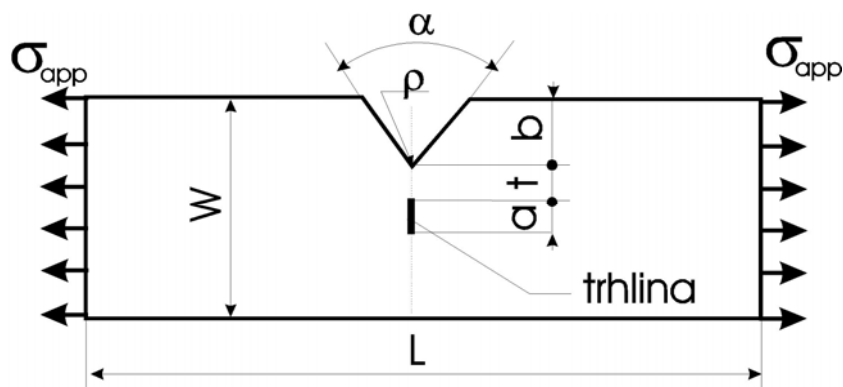


Obr. 6 Závislost T-napětí na poměru a/b pro trhlinu vycházející z V-vrubu a různé úhly otevření vrubu α

Když tyto získané výsledky shrneme, dojdeme k závěru, že existence koncentrátorů napětí, v našem případě modelovaných jako V-vrub a U-vrub, ovlivňuje daleko více velikost T-napětí než velikost odpovídajícího faktoru intenzity napětí. Jestliže má koncentrátor napětí slabší singularitu napětí než trhlina, dochází k poklesu hodnoty faktoru intenzity napětí i k poklesu T-napětí. Na chování trhliny však mají tyto dva jevy rozdílný vliv: zatímco pokles faktoru intenzity napětí zpomaluje popřípadě zastaví růst únavové trhliny, pokles T-napětí trhlinu zrychluje viz kap.5.1. Proto u trhlín, které jsou v poli koncentrátorů napětí s menší koncentrací napětí (menším exponentem singularity) než trhlina, má constraint větší význam na jejich chování, než je tomu u dlouhé trhliny délky $a+b$ odpovídající případu $\alpha=0^\circ$ pro V-vrub a $\rho=0\text{mm}$ pro U-vrub. Tato skutečnost umožňuje kvalitativní vysvětlení anomálního chování krátkých únavových trhlín ve srovnání s trhlínami dlouhými.

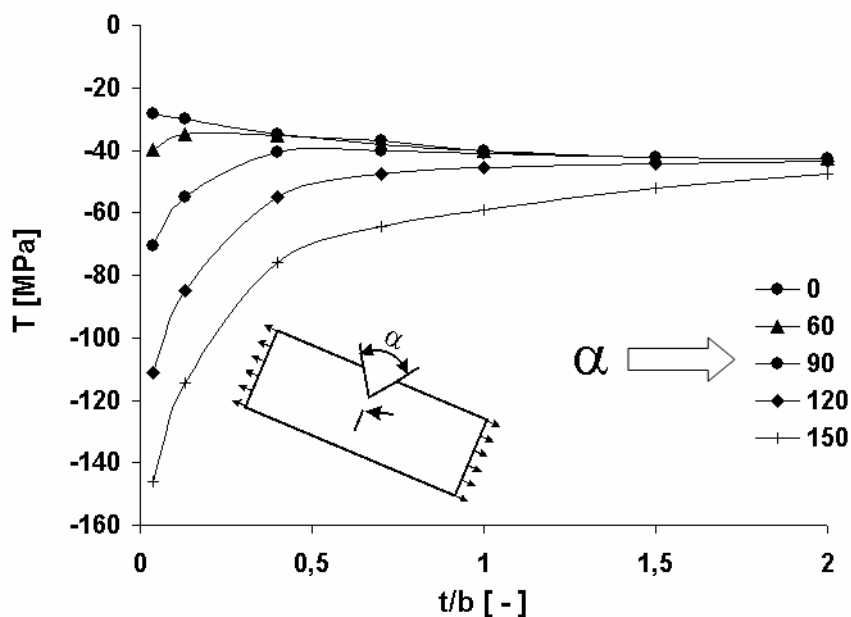
6.2 TRHLINA OVLIVNĚNÁ BLÍZKOSTÍ VRUBU

Problém malé trhliny ovlivněné koncentrátorem napětí je opět modelován pomocí taženého pásu s bočním V-vrubem [11], [12], viz obr.7. Zde byly uváženy jak případy ostrého V-vrubu, tak V-vrubu s nenulovým poloměrem zaoblení v kořeni ρ . Trhlina měla konstantní délku $a = 1\text{mm}$, měnila se vzdálenost od vrubu t , úhel otevření vrubu α a zaoblení v kořeni trhliny ρ . Ostatní rozměry tělesa byly následující: $L=250\text{ mm}$, $W= 50\text{ mm}$ a $b=10\text{ mm}$. Zatěžování trhliny odpovídá módu I a velikost aplikovaného napětí je $\sigma_{\text{app}}=50\text{MPa}$.



Obr. 7 Modelovaný vzorek s V-vrubem v jehož blízkosti je trhlina délky 1mm

Výsledky podrobné analýzy ukazují, že faktor intenzity napětí se mění s geometrií vrubu jen pro $t = 0,5-1$ mm a ani zde však nepřesahuje velikost této změny 5 %. Pro ostrý V-vrub s klesajícím exponentem singularity, tj. s rostoucím úhlem otevření V-vrubu, mírně klesá hodnota K_I , podobně je tomu i pro rostoucí poloměr zaoblení v kořeni trhliny. Vliv geometrie vrubu na faktor intenzity napětí je malý vzhledem k vlivu na velikost T-napětí jak je ukázáno dále.



Obr. 8 Vliv úhlu otevření ostrého V-vrubu na velikost T-napětí pro kořen bližší vrubu

Nyní uvažme vliv geometrie V-vrubu na závislost T-napětí versus normovaná vzdálenost t/b , viz obr.8. V grafu je vidět vliv úhlu otevření V-vrubu na velikost T-napětí pro kořen bližší vrubu. Pro kořen vzdálenější od vrubu je závislost podobná co do trendu, pouze velikost T napětí je v absolutní hodnotě menší. S rostoucím úhlem otevření V-vrubu, tj. s klesajícím exponentem singularity p , velikost T-napětí výrazně klesá. V intervalu $\alpha=0^\circ-60^\circ$ se velikost T-napětí příliš nemění. To je způsobeno poměrně malou změnou exponentu singularity vrubu. Pro větší úhly otevření vrubu je tato změna markantní a může přesahovat až 100%, pokud bereme

jako referenční hodnotu $\alpha=0^\circ$ (trhlina). S rostoucím úhlem otevření V-vrubu sice dochází k malému poklesu faktoru intenzity napětí, ale zároveň ke značné ztrátě constraintu, což vede k růstu velikosti plastické zóny v kořeni trhliny. Předpokládáme-li, že právě velikost plochy plastické zóny je řídicí veličinou rychlosti růstu únavové trhliny, potom taková trhlina roste rychleji než předpovídá jednoparametrový popis.

Naprosto stejný trend platí i pro závislost zaoblení v kořeni vrubu na velikost T-napětí pro oba kořeny trhliny. Pokud dojde k zeslabení koncentrátoru napětí pomocí zvětšení poloměru zaoblení v jeho kořeni, mírně poklesne hodnota faktoru intenzity napětí a zároveň dojde k velké ztrátě constraintu. Důsledky jsou potom stejné jako v předchozím případě, tj. zrychlení růstu únavové trhliny vlivem constraintu a snížení efektivní prahové únavové hodnoty. Paradoxní v tomto studovaném případě je, že trhlina v blízkosti koncentrátoru napětí s nižším exponentem singularity se právě vlivem constraintu bude šířit rychleji než trhlina ovlivněná V-vrubem s $\alpha=0^\circ$ (odpovídající trhlině). Tento jev může mít poměrně velký vliv na odhad životnosti konstrukcí, které takové koncentrátoře obsahují. V disertační práci je dále diskutován vliv kombinovaného módu namáhání na sledované konfigurace a jako doplněk je zde uvedena trhlina šířící se z volného povrchu.

6.3 KVANTIFIKACE VLIVU CONSTRAINTU NA RYCHLOST ŠÍŘENÍ MALÉ TRHLINY

V předchozích kapitolách 6.1 a 6.2 byl analyzován kvalitativní vliv koncentrátorů napětí na chování malé trhliny. V této kapitole kvantifikujeme tyto vlivy za pomoci experimentálně ověřených postupů na dlouhých trhlínách. Protože známe velikosti faktoru intenzity napětí a velikost T-napětí, stačí použít postup popsáný v kapitole 5.1. Vypočteme tak rychlosti šíření malé trhliny v blízkosti koncentrátoru napětí s uvažováním vlivu constraintu. Pro tento výpočet je třeba znát materiálové charakteristiky vstupující do Parisova-Erdoganova vztahu. V tomto případě použijeme hodnoty určené experimentálně na oceli 12 050.1 pro nulovou hodnotu T-napětí (kap.5.3). Nejprve je stanovena hodnota efektivního faktoru intenzity napětí podle vztahu (3) ze známých hodnot K_I , T a σ_0 . Tato veličina se pak dosadí do modifikovaného Parisova-Erdoganova vztahu (4) a vypočtou se rychlosti šíření trhliny. Pro ilustraci je zde uveden pouze jeden výpočet pro všechny sledované konfigurace, ostatní výsledky jsou obdobné. Jako příklad je zde prezentován výpočet rychlosti šíření malých trhlín vycházejících z ostrého V-vrubu s úhlem otevření $\alpha=(0^\circ-150^\circ)$ viz tab.9. Vliv geometrie na hodnoty faktoru intenzity napětí a T-napětí pro tento případ jsou diskutovány v kap.6.1.

da/dN [mm/cyklus] ² ·10 ⁻⁶		a/b									
		da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN	da/dN
		↓ K _I	↓ K _{eff}	↓ K _I	↓ K _{eff}	↓ K _I	↓ K _{eff}	↓ K _I	↓ K _{eff}	↓ K _I	↓ K _{eff}
		0,02		0,05		0,1		0,4		0,7	
Úhel V-vrubu	0	3,53	4,38	3,90	4,86	4,60	5,74	11,90	15,01	29,98	37,27
	30	3,50	4,26	3,89	4,85	4,60	5,64	11,89	14,92	29,97	37,19
	60	3,41	4,25	3,85	4,82	4,60	5,62	11,89	14,81	29,97	37,05
	90	2,81	3,85	3,49	4,70	4,40	5,62	11,86	14,77	29,97	36,87
	120	1,50	3,12	2,36	3,90	3,50	5,21	11,59	14,63	29,88	36,73
	150	0,32	0,91	0,82	1,93	1,70	3,28	9,65	14,30	28,02	36,70

Tab. 9 Rychlosti šíření únavové trhliny z ostrého V-vrubu pro materiál 12050.1

Pro ilustraci rozdílu mezi jednoparametrovým a dvouparametrovým popisem je vždy v prvním sloupci tabulky 9 uvedena rychlost šíření stanovená pouze pomocí faktoru intenzity napětí a v druhém sloupci je pro stejný případ zahrnut vliv constraintu pomocí dvouparametrového přístupu. Je vidět, že vliv constraintu na chování malé trhliny iniciované z vrubu je poměrně velký. V oblasti $a/b=0,1-1$ je rozdíl mezi rychlostí stanovenou klasicky a s uvážením constraintu okolo 30%. Se zkracující se délkou trhliny roste vliv koncentrátoru napětí a dochází k větší ztrátě constraintu viz obr.6 a zvětšuje se tedy rozdíl mezi jedno a dvouparametrovým popisem trhliny. Pro trhlínu délky $a=0,1-0,5$ mm a pro velké úhly otevření vrubu $\alpha=120^\circ-150^\circ$ jsou rychlosti ve srovnání s jednoparametrovým popisem až dvojnásobné. Tyto rozdíly jsou navíc závislé na charakteristikách Parisova-Erdoganova vztahu.

U trhliny šířící se z V-vrubu výrazně narůstá hodnota faktoru intenzity napětí s rostoucí délkou trhliny, a proto výrazně roste i rychlost šíření takové trhliny. Naopak s rostoucím úhlem otevření vrubu α hodnota faktoru intenzity napětí klesá, tento jev však částečně eliminuje vliv constraintu, který s rostoucím α zrychluje růst únavové trhliny. Podobně jako v tomto případě lze kvantifikovat vliv constraintu i ve všech ostatních sledovaných geometriích. Zanedbání vlivu constraintu na rychlost šíření únavových trhlin v těchto případech vždy vede k nekonzervativním odhadům životnosti. Proto použití dvouparametrového popisu úloh tohoto typu je pro korektní odhad životnosti součástí obsahující koncentrátory napětí nezbytný a v řadě případů i klíčový.

7 ZÁVĚR

Tato práce si kladla za cíl popsat vliv constraintu na chování malých trhlin v okolí koncentrátorů napětí, a tak zpřesnit jejich popis. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že prezentovaný přístup umožňuje kvalitativní a kvantitativní posun v otázkách odhadu rychlosti šíření malých trhlin ovlivněných koncentrátorem napětí. Závěry jsou formulovány do několika okruhů v souladu se stanovenými cíli této práce:

Numerické výpočty

- V oblasti numerických výpočtů byly studovány zejména možnosti stanovení lomových parametrů v rámci dvouparametrového popisu pomocí modelů využívajících metodu konečných prvků. Pro všeobecně dobrou dostupnost byl pro řešení MKP modelů zvolen komerční výpočtový systém Ansys.
- Byly porovnány dvourozměrné a trojrozměrné modely MKP, diskutována jejich vhodnost k plánovaným výpočtům a možnosti stanovení lomových parametrů na takových modelech. Jako optimální varianta se nakonec ukázal dvourozměrný model vrubu s trhlinou.
- Byly studovány možnosti stanovení lomových parametrů a jejich vypovídací schopnost o chování trhliny. Tato práce je zaměřena na oblast vysokocyklové únavy, zatížení je vzhledem k mezi kluzu daného materiálu poměrně nízké a malá trhlina se nachází v elastickém poli koncentrátoru napětí. Proto byl zvolen pro popis těchto trhlin faktor intenzity napětí spolu s hodnotou T-napětí.
- Byl navržen postup pro trojrozměrné výpočty T-napětí pomocí metody posunutých uzlových bodů.
- Byly porovnány výpočty T-napětí pomocí různých přístupů a to: metod přímých, metody posunutých uzlových bodů, metody hybridních elementů a výpočet pomocí M-integrálu. Jako nejvhodnější se ukázalo počítat T-napětí pomocí metody M-integrálu. Tato metoda je přesná a použitelná ve studovaných případech.

Chování dlouhých únavových trhlin

- Pro popis vlivu constraintu na chování únavové trhliny bylo třeba najít vhodnou metodu využívající K-T popisu. Jako nejvhodnější se ukázala metoda publikovaná v roce 2000 Knéslem, Bednářem a Radonem [14]. Tato metodika zohledňuje vliv T-napětí pomocí porovnání plastických zón před čelem trhliny a zavádí pojem efektivní hodnoty faktoru intenzity napětí K_{eff} .
- Za účelem ověření její platnosti byly provedeny experimenty. Pro dva vzorky s výrazně odlišnou hodnotou T-napětí (vzorek s centrální trhlinou CCT a vzorek namáhaný excentrickým tahem CT) vyrobené ze stejného materiálu (ocel 12050.1) byly stanoveny hodnoty rychlosti šíření únavové

trhliny. Zjištěné odchylky v rychlosti šíření mezi vzorky s rozdílnou geometrií byly vysvětleny pomocí vlivu constraintu na rychlost šíření. Postup popisu chování únavové trhliny byl verifikován v celé oblasti platnosti Parisova-Erdoganova popisu a zvláště v oblasti prahových hodnot šíření únavových trhlin. Bylo dosaženo dobré shody mezi experimentálním měřením a predikcí na základě numerického modelování.

- Speciální pozornost byla věnována oblasti prahových hodnot a nízkých rychlostí šíření, která je důležitá vzhledem ke studované problematice. Nízká hladina constraintu posouvá prahové hodnoty šíření trhliny níž než odpovídá nulovému constraintu.

Modelování a numerické výpočty v oblasti malých trhlin

- Jako model koncentrátoru napětí byl zvolen ostrý V-vrub, V-vrub s nenulovým poloměrem zaoblení v kořeni vrubu a U-vrub.
- Jako model malé trhliny ovlivněné obecným koncentrátorem napětí byl navržen tažený pás s bočním vrubem rozmanité geometrie, který má ve své blízkosti malou trhlínu. Tento model je řešen jako dvourozměrná úloha s podmínkou rovinné deformace. Tomu odpovídala hustota sítě MKP modelu. V okolí kořene trhliny byly degenerované 8-uzlové prvky s posunutými uzlovými body do 1/4 délky prvku.
- Pro sledované konfigurace byly stanoveny hodnoty faktoru intenzity napětí pomocí metody posunutých uzlových bodů a hodnoty T-napětí pomocí M-integrálu.

Popis chování malých trhlin

- Byla modelována trhlina iniciovaná v kořeni ostrého V-vrubu a U-vrubu. U všech geometrií vrubů je T-napětí v kořeni trhliny záporné a zrychluje růst únavové trhliny. Nejnižších hodnot dosahuje T-napětí pro V-vrubby s velkým úhlem otevření přes 120° a pro U-vrubby s velkým poloměrem zaoblení přes 3 mm. U těchto geometrií je vliv constraintu největší a rychlost šíření může být až dvojnásobná, než je odhad, který nebere v úvahu constraint.
- Podobným způsobem byla analyzována i trhlina pohybující se v poli napětí V-vrubu, situovaná do určité vzdálenosti od kořene vrubu. Závislosti faktoru intenzity napětí i T-napětí byly podobné jako v předchozím případě. Když se přibližuje trhlina ke kořeni vrubu, roste velikost faktoru intenzity napětí a klesá hodnota T-napětí. Tento jev je zvláště patrný pro velké úhly otevření vrubu $\alpha > 90^\circ$ nebo velké poloměry zaoblení vrubu $\rho > 3$ mm. Efekt je stejný jako v předchozím případě a vlivem vrubu dochází k zrychlování růstu únavové trhliny. Pro kořen trhliny bližší kořeni vrubu je velikost faktoru intenzity napětí větší a hodnota T-napětí nižší než pro ten vzdálenější. Trhlina bude tedy růst rychleji směrem k vrubu, spojí se s ním a přejde tak na první studovaný případ trhliny šířící se z vrubu.

- Dalším studovaným problémem byla obecně orientovaná trhlinka v poli napětí V-vrubu. Vliv geometrie vrubu je stejný jako případě trhliny namáhané pouze normálovým módem zatěžování. S rostoucím úhlem natočení trhliny vzhledem k normálovému módu namáhání roste podíl II módu zatěžování, roste hodnota K_{II} , klesá hodnota K_I a klesá hodnota T-napětí. Pro trhlinku je nejvýhodnější normálový mód zatěžování, proto se snaží do tohoto směru z obecné orientace natočit. Úhel tohoto natočení byl predikován z modifikovaných vztahů pro směr šíření trhliny.
- Byly kvantifikovány rychlosti šíření trhlin pro studované konfigurace pomocí postupu zohledňujícího vliv constraintu pro různé materiály.

Vliv constraintu na chování malé trhliny v okolí koncentrátoru napětí je poměrně silný a obecně zrychluje růst únavové trhliny a snižuje velikost prahových hodnot šíření trhlin. V práci je navrženo vysvětlení a kvantifikace tohoto jevu na základě fenomenologického popisu constraintu pomocí dvouparametrové lomové mechaniky. V oblasti vysokocyklové únavy je nejvhodnější K-T popis. Prezentované výsledky mohou pomoci kvalitativně zlepšit odhady životnosti konstrukcí obsahující koncentrátor napětí.

Tato práce byla vypracována za finanční podpory těchto grantů:

- **GA AV ČR č.K2076106** Role rozhraní dvou materiálů v lomové mechanice 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 SUMMARY

The thesis investigates the influence of constraint on the behavior of small cracks near stress concentrators. The problem is approached by means of linear elastic fracture mechanics and numerical results are obtained by the finite element method (Ansys). A small crack is defined as being approximately 1mm in length and within the region of influence of the stress field of the stress concentrator. The stress concentrator was modelled as a sharp V-notch and V-notch with radius in the notch tip and U-notch. The geometric configuration notch + crack produces a low level of constraint. This has a effect on fatigue crack growth: in a low level of constraint the fatigue crack growth is faster than in a higher one. T-stress was used to describe the influence of constraint. In high cycle fatigue the propagation rate of crack is often described by the Paris-Erdogan law. This relation depends only on the stress intensity factor, but if the plastic zone size depends on the T-stress, a two parameter description must be used. One way is to use the effective stress intensity factor K_{eff} , which is a function of stress intensity factor and T-stress. This method was verified by experimental results. Discrepancies in the fatigue crack growth rate and the threshold values for the two specimens with different geometries (the CCT-central crack specimen and the CT-compact tension specimen) were explained by K-T description of the crack tip stress field. It is concluded that the level of the constraint may influence the fatigue crack propagation rate substantially. For the same nominal level of the stress intensity factor K_i , the high cycle fatigue crack propagation rate increases with a decreasing level of the constraint. Correspondingly, the value of the fatigue threshold K_{th} decreases with increasing constraint level.

This methodology was applied to the problem of small cracks. The small crack has been modelled as a crack initiated and growing from the tip of a notch or small crack approximately 1mm within the region of influence of the notch. The results for all configurations are similar, the existence of a stress concentrator accelerates the fatigue crack growth rate. The effect of the constraint is strong in this case, because the stress concentrators cause a loss of constraint near the crack tip. In these cases it is necessary to quantify the constraint and in the area of the high cycle fatigue K-T description cannot be omitted. The results generally contribute to a better understanding of the failure and increases reliability of life estimations of structures with stress concentrators.

9 LITERATURA

- [1] Anderson, T. L., *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, CRC Press Inc., 1995
- [2] Annual Book of ASTM Standards 2001, *Metals-Mechanical Testing: Elevated and Low-Temperature Tests*, *Metallography*, Vol.3.1, 2001
- [3] Bednář, K., *Dvoupárametrová lomová mechanika - výpočet parametrů a jejich význam při popisu chování únavových trhlin*, Disertační práce, Brno, 1999
- [4] Duggan, T. V., *A theory for fatigue crack propagation*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp.735-747, 1977
- [5] Gröger, R., Hutař P., *Výpočet lomových parametrů pro trhlinu iniciovanou ve vrcholu V-vrhu*, *Aplikovaná mechanika* 2001, Nečtiny, pp.55-62, 2001
- [6] Hasebe, N., Iida, J., *A crack originating from a triangular notch on a rim of semi-infinite plate*, *Engng. Fracture Mechanics*, Vol.10, pp.773-782, 1978
- [7] Hutař P., Knésl Z., *The effect of V-notch on the propagation rate of a fatigue crack*, *Engineering Mechanics* 2001, Svatka, na CD, 2001
- [8] Hutař P., *Určení hodnoty T-napětí pro 3D úlohy*, *Výpočtová mechanika* 2002, Nečtiny, pp.133-140, 2002
- [9] Hutař P., *Vliv vrhu na šíření únavové trhliny*, *Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI-2001*, pp. 66-69, Brno, 2001
- [10] Hutař P., *Kvantifikace constraintu pro 3D úlohy*, *Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI-2002*, pp.66-69, Brno, 2002
- [11] Hutař P., *The two-parameter description of short cracks near the stress concentrators*, *Applied Mechanics* 2003, pp.95-100, Jaworzinka, 2003
- [12] Hutař P., Knésl Z., *Fracture behaviour of the short cracks near the stress concentrator*, *Engineering Mechanics* 2003, na CD, Svatka, 2003
- [13] Knésl Z., Hutař P., Seitzl S., *Výpočet faktoru intenzity napětí metodou konečných prvků*, *MKP* 2002, Praha, pp.50-65, 2002
- [14] Knésl, Z., Bednář, K., Radon, J. C., *Influence of T-stress on the rate of propagation of fatigue crack*, *Physical Mesomechanics*, Vol.3, pp.5-9, 2000
- [15] Murakami, Y. and Co-editors, *Stress intensity factors handbook* Vol.1,2,3,4,5, The Society of Mat. Science & Elsevier Science, 1987-2001
- [16] Seitzl, S., *Dvoupárametrová lomová mechanika - popis krátkých únavových trhlin*, Disertační práce, Brno, 2003
- [17] Sherry, A. H., France, C. C., Goldthorpe, M. R., *Compendium of T-stress solutions for two and three dimensional cracked geometries*, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol.18, pp.141-155, 1995
- [18] Seitzl S., Hutař P., Knésl Z., *Stanovení hodnot T-napětí metodou konečných prvků*, *Výpočty MKP* 2003, Brno, 2003
- [19] Tong, J., *T-stress and its implications for crack growth*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, pp.1325-1337, 2002
- [20] Vecchio, R. S., Crompton, J. S., Hertzberg, R. W., *The influence of specimen geometry on near threshold fatigue crack growth*, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol.10, pp.333-342, 1987

10 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

- I. Gröger, R., Hutař P., *Výpočet lomových parametrů pro trhlinu iniciovanou ve vrcholu V-vrubu*, Aplikovaná mechanika 2001, Nečtiny, pp.55-62, 2001
- II. Hutař P., Knésl Z., *The effect of V-notch on the propagation rate of a fatigue crack*, Engineering Mechanics 2001, Svratka, na CD, 2001
- III. Hutař P., *Problematika stanovení Q-parametru*, Problémy lomové mechaniky I, Brno, pp. 40-47, 2001
- IV. Seitl S., Hutař P., Knésl Z., *Two-parameter approach for short cracks at notches*, 3th International Conference on Materials Structures and Micromechanics of Fracture, Brno, pp. 387-393, 2001
- V. Hutař P., *Vliv T-napětí na charakteristiky popisující únavovou trhlinu při cyklickém namáhání*, Výpočtová mechanika 2001, Nečtiny, pp.105-112, 2001
- VI. Hutař P., *Vliv vrubu na šíření únavové trhliny*, Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI-2001, pp. 66-69, Brno, 2001
- VII. Hutař P., *Vliv vrubu na šíření únavové trhliny*, Lomová mechanika a její aplikace (cyklus přednášek v rámci české společnosti pro mechaniku), Brno, 2001
- VIII. Hutař P., *Dvoupárametrový popis otevření trhliny*, Aplikovaná mechanika 2002, Ostrava, pp. 151-159, 2002
- IX. Hutař P., Knésl Z., *Vliv T-napětí na přepočtové vztahy pro otevření v kořeni trhliny a J-integrál*, Engineering Mechanics 2002, Svratka, na CD, 2002
- X. Hutař P., *Závislost proporčního faktoru na T-napětí*, Únava a lomová mechanika 2002, Žinkovy, 2002
- XI. Hutař P., *Závislost proporčního faktoru na T-napětí*, Soutěž doktorandů-ÚFM 2002 (cyklus přednášek), Brno, 2002
- XII. Hutař P., *Vliv velikosti koeficientu zpevnění na parametry popisující plastickou zónu*, Problémy lomové mechaniky II, Brno, pp.33-41, 2002
- XIII. Knésl Z., Seitl S., Hutař P., *Accounting for effects of constraint on propagation of fatigue crack*, Damage & Fracture mechanics VII, WIT press, pp.245-253, 2002
- XIV. Hutař P., *Určení hodnoty T-napětí pro 3D úlohy*, Výpočtová mechanika 2002, Nečtiny, pp.133-140, 2002
- XV. Knésl Z., Hutař P., Seitl S., *Výpočet faktoru intenzity napětí metodou konečných prvků*, MKP 2002, Praha, pp.50-65, 2002
- XVI. Hutař P., *Kvantifikace constraintu pro 3D úlohy*, Soutěž vědeckých a výzkumných prací doktorandů FSI-2002, pp.66-69, Brno, 2002
- XVII. Hutař P., *Dvoupárametrový popis malých trhlín ovlivněných polem napětí obecných koncentrátorů*, Pojednání ke státní doktorské zkoušce, Brno, 2002
- XVIII. Hutař P., *The two-parameter description of short cracks near the stress concentrators*, Applied Mechanics 2003, pp.95-100, Jaworzinka, 2003
- XIX. Hutař P., Knésl Z., *Fracture behaviour of the short cracks near the stress concentrator*, Engineering Mechanics 2003, na CD, Svratka, 2003
- XX. Klusák J., Seitl S., Hutař P., Náhlík L., Knésl Z., *Comparison of fracture behaviour of a crack and general singular stress concentrators*, Engineering Mechanics 2003, na CD, Svratka, 2003
- XXI. Hutař P., Seitl S., Knésl 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, pp.146, Budapest, 2003, v tisku

- XXII. Knésl Z., Hutař P., Seitzl S., *Calculation and assessment of constraint for short fatigue cracks*, 13th International Workshop on Computational Mechanics of Materials, pp.29, Magdeburg, 2003, *v recenzním řízení*
- XXIII. Hutař P., *Únavové chování obecně orientované trhliny v blízkosti koncentrátoru napětí*, Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny, pp.137-144, 2003
- XXIV. Seitzl S., Hutař P., Knésl Z., *Stanovení hodnot T-napětí metodou konečných prvků*, Výpočty MKP 2003, Brno, 2003

11 CURRICULUM VITAE

Jméno: Pavel HUTAŘ, Ing.
 Datum narození: 4. července 1977
 Adresa: Fleischnerova 11, Brno, 635 00
 Telefon: 532 290 351
 Národnost: česká
 E-mail: hutar@ipm.cz
 Homepage: www.hutar.wz.cz



Vzdělání:

2000-2003 Interní doktorské studium na Ústavu mechaniky těles FSI VUT v Brně a Ústavu fyziky materiálů Akademie věd ČR, obor Inženýrská mechanika

1995-2000 Inženýrské studium na Ústavu mechaniky těles FSI VUT v Brně obor Aplikovaná mechanika-Inženýrská mechanika

1991-1995 Střední průmyslová škola na Kotlářské, Kotlářská 9, Brno

Odborná praxe:

2000-2003 Spolupráce na řešení grantů GA ČR a GA AV: "Role rozhraní dvou materiálů v lomové mechanice", "Šíření únavových trhlin přes rozhraní dvou materiálů", "Simulace šíření únavových trhlin ve složitých provozních podmínkách metodou konečných prvků".

2000-2003 Vyučující předmětu Pružnost a pevnost II na FSI VUT v Brně