

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 747

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Libor Holáň

**Šířev
Šíření dlouhých únavových trhlin
v austenitické oceli
při smykových módech II a III**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Libor Holář

**ŠÍŘENÍ DLOUHÝCH ÚNAVOVÝCH TRHLIN
V AUSTENITICKÉ OCELI
PŘI SMYKOVÝCH MÓDECH II A III**

PROPAGATION OF LONG FATIGUE CRACKS
IN AUSTENITIC STEEL UNDER MODES II AND III

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství
Školitel: prof. RNDr. Jaroslav Pokluda, CSc.
Oponenti: prof. RNDr. Jaroslav Polák, DrSc.
Ing. Jiří Man, Ph.D.
Datum obhajoby: 4. října 2013

Klíčová slova:

šíření trhliny, prahová hodnota faktoru intenzity napětí, módy II a III, austenitická ocel, kvantitativní fraktografie.

Keywords:

crack propagation, fatigue threshold, mode II and III, austenitic steel, quantitative fractography.

Dizertační práce je uložena

na oddělení vědy a výzkumu FSI VUT v Brně, Technická 2,
616 69 Brno.

© Libor Holář, 2013

ISBN 978-80-214-4996-1

ISSN 1213-4198

Obsah

1 Úvod	5
2 Cíle Práce	5
3 Únava materiálu	5
3.1 Stádium iniciace trhliny	6
3.2 Stádium šíření trhliny	6
3.3 Zavírání dlouhých trhlin	6
4 Mikromechanismy šíření dlouhých únavových trhlin	7
4.1 Zátěžné módy	7
4.2 Deformační model	7
4.2.1 Mechanismus šíření trhliny v módu I	7
4.2.2 Mechanismus šíření trhliny v módu II	8
4.2.3 Mechanismus šíření trhliny v módu III	9
4.3 Dekohezní model	10
4.3.1 Mechanismus šíření trhlin v módu I	10
4.3.2 Mechanismus šíření trhliny v módu II	10
4.3.3 Mechanismus šíření trhliny v módu III	12
4.4 Model šíření trhliny v módu III v lokálním módu II	12
5 Kvantitativní fraktografie	13
5.1 Některé experimentální výsledky šíření trhlin ve smykových módech	13
5.2 Metody rekonstrukce morfologie lomových ploch	13
5.2.1 Metody pro měření povrchové topografie	13
6 Vývoj experimentu	15
6.1 Použité metody pro kvantifikaci lomových ploch	15
7 Šíření smykových trhlin v prahové oblasti v austenitické oceli	16
7.1 Použité vzorky a přípravky	16
7.2 K-kalibrace vzorků	17
7.3 Rekonstrukce lomových povrchů	19
7.3.1 Stanovení efektivních prahových hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí $\Delta K_{eff,th}$	21
8 Diskuze výsledků	22
9 Závěr	23
Vlastní publikace autora	27
Curriculum Vitae	28
Abstract	29

1 Úvod

První studie lomů materiálů způsobených únavou jsou datovány od 19. století. Výzkumy se ubíraly směrem prevence iniciace únavových trhlin a následného poškození konstrukčních součástí. V posledních desetiletích je únava materiálu studována v mnoha vědních oborech, jako jsou např. biomechanika, fyzika pevných látek, materiálové, stavební a letecké inženýrství.

Únavový lom je zdaleka nejčastějším a inženýrsky nejdůležitějším provozním mezním stavem, neboť kolem 80 % provozních lomů je únavového typu [1, 2]. Zatímco jsou základní mikromechanismy růstu únavových trhlin v kovových materiálech v zátěžných módech I a II dobře známy, není tomu tak v případech růstu únavové trhliny v prostém módu III [3–5]. Hlavním problémem je z teoretického pohledu skutečnost, že opakovaný pohyb geometricky nutných hranových dislokací v nejjednodušších modelech pro módy I a II vytváří nové lomové povrchy podél celého čela trhliny v každém cyklu. Naproti tomu šroubové dislokace vytváří v prostém módu III pouze schodky na povrchu roviny vzorku.

Poškození působením smykového módu III je součástí mnoha inženýrských aplikací, jako jsou pružiny, torzní hřídele, lopatky turbín a přenosové součásti v automobilovém průmyslu [6].

Dosud ve světě prováděné experimenty byly založeny na namáhání prostým krutem nebo asymetrickým 4-bodovým ohybem [5, 7]. Tento způsob zatěžování s sebou přináší některé obtížně řešitelné problémy jako například superpozici módu I. Proto bylo ve spolupráci s Erich Schmid Institutem v Leobenu postaveno zařízení, umožňující zatížení prostým smykem, pomocí něhož bylo možno ověřit platnost modelu Pokludy a Pippana [3, 4] v oblasti nízkocyklové únavy. Tento model vysvětluje mikromechanismus šíření trhlin v tvárných materiálech ve smykovém módu III jako postupný růst čela trhliny sekvencí módu II. Jeho předpokladem je mikrokrivolaké čelo šířící se trhliny nebo asistence částic sekundární fáze. Pro předložený model hovoří skutečnost, že čelo reálné trhliny není nikdy mikroskopicky rovné, tudíž i při makroskopicky prostém módu III je vždy přítomen mikroskopický mód II.

2 Cíle Práce

Cílem mojí práce bylo provedení experimentů, umožňující zatížení vzorků současně v prostých smykových módech II, III a smíšeném módu II+III. Dále pak kvantitativní vyhodnocení lomových ploch za použití 3D rekonstrukce pro identifikaci mikromechanismu šíření únavových trhlin v módu II a III v oblasti vysokocyklové únavy, jakož i nalezení efektivních prahových hodnot rozkmitů faktorů intenzity napětí.

Teprve data získaná z takto navrženého experimentu (tj. zanedbatelný vliv stínících mechanismů) umožňuje srovnávání s navrženými teoretickými dislokačními modely s podporou molekulární dynamiky a ab initio výpočtů. Objasnit lokální aspekty šíření v jednotlivých smykových módech II a III.

Na základě použité metody vytváření iniciační trhliny a způsobu tepelného zpracování bylo možno dané prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí považovat za tzv. efektivní (inherentní) [8].

3 Únava materiálu

Slovo „únava“ se stalo široce rozšířeným pojmem v technické oblasti jako výraz pro poškození nebo selhání konstrukčního dílce vlivem cyklického namáhání materiálu. Samotná definice únavy byla přijata již v roce 1964 Mezinárodní organizací pro standardizaci v Ženevě, podle níž únava vyjadřuje změny vlastností, které se mohou vyskytnout v kovech v důsledku opakujícího

se zatížením napětím nebo deformací. Únavové poškození se vyskytuje v mnoha rozličných formách. K únavě materiálu dochází vlivem cyklického zatížení, jehož maximální hodnoty jsou výrazně menší než při kterých dochází ke statickému poškození [1].

Nejvýznamnější jsou práce Wöhlera [9], který položil základ strategie, jež umožňuje vyloučit havárie způsobené únavou, což jsou únavové zkoušky litin, ocelí a dalších kovů při ohybovém, krutovém i osovém zatěžování. Wöhler také ukázal, že únavové chování materiálu je ovlivněno nejen amplitudou napětí, ale i hodnotou středního napětí [10].

3.1 Stádium iniciace trhliny

Ve většině případů začíná únavový lom v nejvíce zatěžované části součásti. Ke vzniku únavové trhliny mohou vést i velmi malé defekty, jako jsou póry nebo vměstky, proto je nutno klást velký důraz na výrobní proces u součástí, jež budou vystaveny cyklickému namáhání. Ovšem ani v případě, kdy daná součást nebude obsahovat dané iniciační defekty, není zaručeno, že nedojde ke vzniku trhlin. Vlivem cyklického zatěžování dochází ke zdrsňení povrchu součásti a následné iniciaci trhlin [11].

Přímé metody pozorování prokázaly, že k iniciaci únavových trhlin dochází zpravidla na povrchu materiálu. Výjimku mohou tvořit materiály s vnitřními strukturními defekty dostatečného rozměru a tzv. gigacyklová únava [12].

3.2 Stádium šíření trhliny

Ve druhé polovině 20. století se pro popis šíření trhlin začala široce používat lineární lomová mechanika. Tato teorie je založena na mechanice kontinua a jedinými materiálovými charakteristikami, které v ní kromě elastických konstant explicitně vystupují, jsou odpory proti iniciaci a šíření trhliny, vyjádřené makroskopickými empirickými parametry. Strukturní charakteristiky jsou v těchto parametrech zahrnuty pouze implicitně. Až do 70. let se čela trhlin a lomové plochy uvažovaly jako přímky a úsečky, resp. roviny, a mikrogeometrie reálných trhlin indukovaná strukturou se zanedbávala. Používané vztahy pro faktor intenzity napětí závisely tedy pouze na makroskopické geometrii vzorku s trhlinou a způsobu jeho vnějšího zatížení. Předpokládalo se, že jednoparametrická lineární lomová mechanika v tomto klasickém pojetí bude dostačující pro obecný inženýrský popis prahových hodnot a rychlosti šíření trhlin zejména při vysokocyklové únavě materiálu [13].

V průběhu 70. a 80. let bylo zřejmé, že užití klasické lineární lomové mechaniky má významné omezení z hlediska délky trhlin, jejich mikrogeometrie i makrogeometrie tělesa s trhlinou. Chování krátkých trhlin se obecně vymyká rámci lineární lomové mechaniky a i v případě dlouhých trhlin je často do ní nutno explicitně zahrnout mikrogeometrii trhlin, statistický přístup, popř. stísněnost deformace (tzv. dvouparametrová lineární lomová mechanika) [13].

3.3 Zavírání dlouhých trhlin

Na počátku 70. let bylo zjištěno, že dlouhá únavová trhlina zůstává zavřena nejen po dobu tlakové fáze zátěžného cyklu, nýbrž částečně i v jeho tahové fázi. Projevuje se tedy jako ostrý koncentrátor napětí jen v té části cyklu, kdy je otevřena, a k jejímu šíření přispívá pouze příslušná efektivní hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_{eff} , která může být podstatně menší než aplikovaná hodnota ΔK . Ve výše uvedených rovnicích pro popis šíření je tedy vhodné nahradit hodnotu ΔK hodnotou ΔK_{eff} . Nicméně se ukázalo, že je zavírání trhliny

v kovových materiálech způsobeno třemi základními procesy, jejichž působení se omezuje zejména na lomové plochy za čelem únavové trhliny [1, 2, 14]): (a) lokální plastickou deformací (protažením) materiálu v okolí lomových ploch - tzv. plasticky indukované zavírání (PIC), (b) drsností lomových ploch - tzv. drsnostně indukované zavírání (RIC) a (c) oxidickými mikročásticemi na lomových plochách - tzv. oxidicky indukované zavírání (OIC).

4 Mikromechanismy šíření dlouhých únavových trhlin

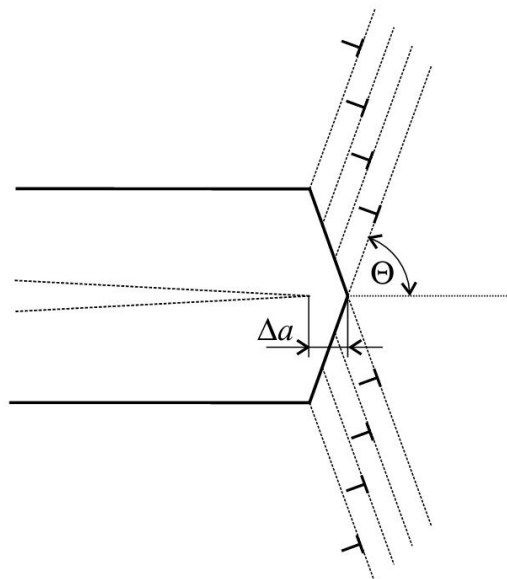
4.1 Zátěžné módy

Základní lomově mechanický koncept je odvozen pomocí pohybu lomových povrchů tělesa [7, 15]. Jestliže se povrchy trhlin pohybují odděleně ve směru kolmém k povrchům, jedná se o tzv. mód I, dochází-li k pohybu povrchu trhlin ve směru kolmém k čelu trhliny v rovině povrchů, hovoříme o módu II. V případě módu III dochází k pohybu povrchů trhlin rovnoběžně k jejímu čelu.

4.2 Deformační model

4.2.1 Mechanismus šíření trhliny v módu I

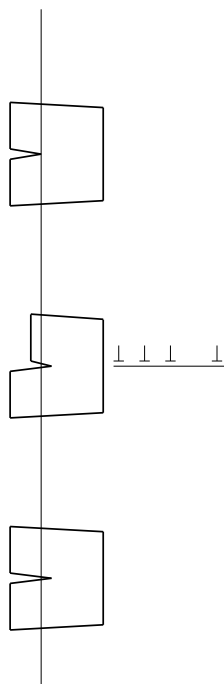
Plastická deformace je z atomového hlediska v kovových materiálech obvykle realizována pohybem dislokací. Deformace v ideálním módu I na čele trhliny je způsobena symetrickou emisí hranových dislokací na čele trhliny viz obr. 1. Tyto dislokace způsobují formování nových lomových povrchů, jejichž plocha je úměrná součinu Burgersova vektoru, počtu vytvořených dislokací a délky čela trhliny. K vytvoření nového povrchu, který vznikl během zatížení vzorku (růst napětí), dojde za předpokladu, že vzniklý lomový povrch bude oxidovat. Vzniklá oxidační vrstva zabrání zániku dislokací vracejících se zpět k čelu trhliny a regenerace atomových vazeb.



Obrázek 1: Cyklická deformace a formování nových povrchů v módu I na čele trhliny z dislokačního hlediska [3]

4.2.2 Mechanismus šíření trhliny v módu II

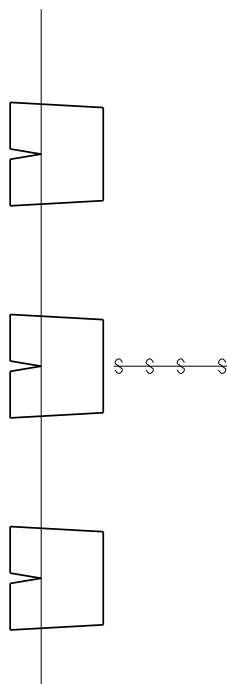
Deformace v ideálním módu II je způsobena hranovými dislokacemi v rovině trhliny viz obr. 2. Tyto hranové dislokace vytvářejí nové lomové povrchy na jedné straně povrchu trhliny, kde je nově vzniklý povrch definován součinem Burgersova vektoru, počtem dislokací a délkou čela trhliny. Pokud opět předpokládáme oxidaci zabraňující regeneraci dislokací meziatomových vazeb, dojde ke vzniku nového povrchu před čelem trhliny, který bude roven součinu počtu emitovaných dislokací, Burgersova vektoru a délky čela trhliny.



Obrázek 2: Cyklická deformace a formování nových povrchů v módu II na čele trhliny z dislokačního hlediska [3]

4.2.3 Mechanismus šíření trhliny v módu III

V případě idealizovaného módu III jsou v okolí čela trhliny vytvářeny šroubové dislokace tvořící plastickou zónu, tedy podobně jako hranové dislokace v módu II. Nicméně tyto šroubové dislokace nevytváří nové povrchy před čelem trhliny, jelikož je s ním Burgersův vektor rovnoběžný. Naopak v rovině pohybu šroubových dislokací jsou na povrchu tělesa vytvářeny „schodky“ – každá dislokace vytvoří „schodek“, který je roven jejímu Burgersovu vektoru. Během dalšího zatěžování však může docházet k růstu trhliny v módu II podél čela trhliny viz dále. Obr. 3 znázorňuje schéma růstu trhliny ve smykovém módu III z dislokačního hlediska.



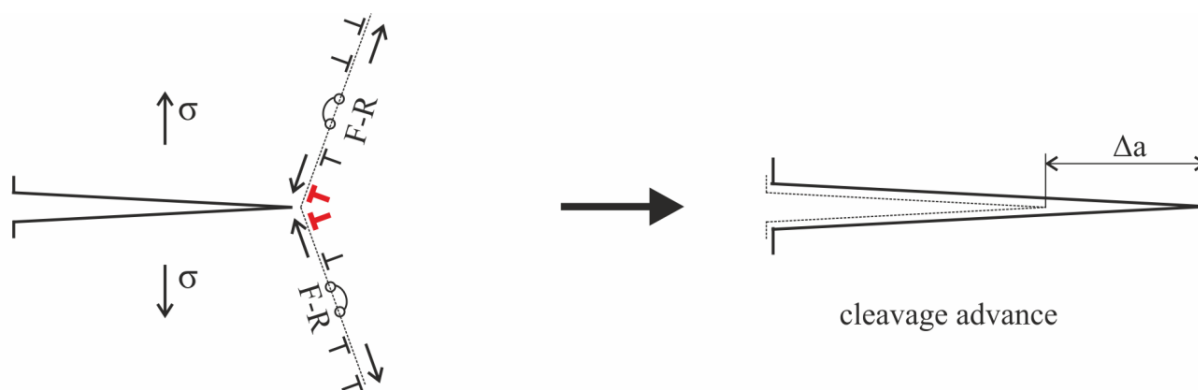
Obrázek 3: Cyklická deformace a formování nových povrchů v módu III na čele trhliny z dislokačního hlediska [3]

4.3 Dekohezní model

Dekohezní model [16, 17] předpokládá, že plasticita je způsobena pouze interními dislokačními zdroji. Dislokace, vytvořené v plastické zóně, se mohou dostat mimo čelo trhliny. Jestliže se jedna z nich dostane velmi blízko k čelu trhliny, mohou způsobit anti-stínění. Trhlina se následně šíří dekohezí až k této anti-stínící dislokaci. Tato situace může nastat pouze, jestliže anti-stínící dislokace je vzdálena několik mřížkových konstant od čela trhliny. Trhlina by se neměla šířit ve skluzové rovině tj. měla by růst převážně v módu I v důsledku štěpení nebo nekrytalograficky.

4.3.1 Mechanismus šíření trhlín v módu I

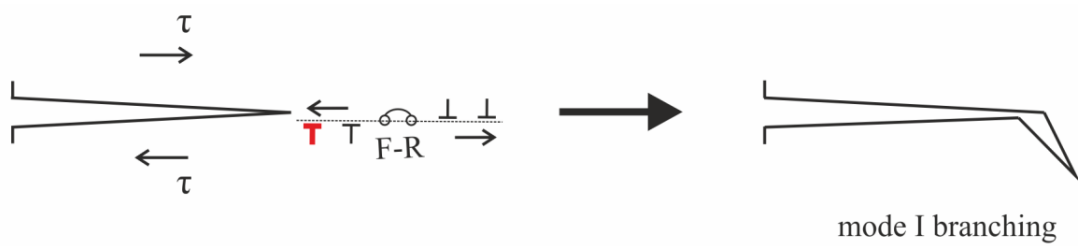
Model Needlemana et al. [18] předpokládá nukleaci dislokací z Frank-Readových zdrojů rozptýřených v celém objemu materiálu, nikoliv nukleaci dislokací na čele trhliny. Daný model se znázorněným čelem trhliny je uveden na obr. 4. Předpokladem při výpočtu byl vznik malé plastické zóny před čelem trhliny (tzv. small scale yielding) při rovinném stavu deformace.



Obrázek 4: Model předpokládající šíření trhliny v módu I dekohezí [16]

4.3.2 Mechanismus šíření trhliny v módu II

Pravděpodobnost toho, že bude rovina trhliny rovnoběžná se skluzovou rovinou a koplanární s vnitřním dislokačním zdrojem je velmi malá, vytvořené dislokace tak nezpůsobí skluzový posuv čela trhliny. Jedna část emitovaných dislokací se bude šířit před čelem trhliny, druhá naopak za čelem trhliny, to v závislosti na poloze dislokačních zdrojů (viz. obr 5). Některé z těchto dislokací pohybující se před čelem trhliny mohou vytvářet lokální dekohezi. Velmi pravděpodobný směr šíření trhliny je dán maximální tahovou složkou superpozice napěťového pole čela trhliny a dislokace tj. největší hodnotou lokálního k_I . K tomu dojde při odklánění čela trhliny a vytváření lokálního vyhnutí.



Obrázek 5: Model předpokládající šíření trhliny v módu II dekohezí [16]

4.3.3 Mechanismus šíření trhliny v módu III

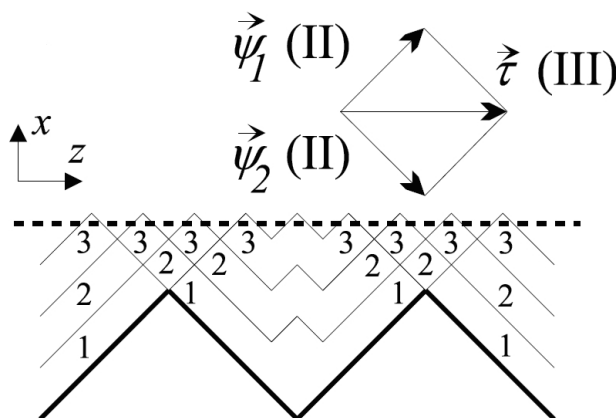
V případě módu III není vysvětlení růstu pomocí dekoheze přímé, jelikož tyto trhliny nevytváří tahové napětí ani při vyhnutí. Pouze tahové napětí vytvořené z hranového segmentu dislokace poblíž čela trhliny může způsobit dekohezi. Pouze segmenty čela trhliny zatěžované v lokálním módu II se mohou šířit jako v prostém globálním módu II. Segment lokálního módu II na čele trhliny módu III se tak může odklonit z makroskopické roviny trhliny podobně jako trhlina v módu II. Dekohezní model šíření trhliny v módu III je znázorněn na obr. 6 – ideální model nepředpokládá šíření.



Obrázek 6: Ideální model nešíření trhliny v módu III dekohezí [16]

4.4 Model šíření trhliny v módu III v lokálním módu II

Model Pokludy a Pippana [3] předpokládá makroskopicky rovné, ale mikroskopicky křivolaké čelo trhliny při zatěžování prostým módem III (obr. 7). Trojúhelníkové „mikrovýběžky“ jsou zatíženy ve smíšeném módu II+III, nicméně vektor smykového napětí může být rozložen na dvě složky prostého módu II kolmé k trojúhelníkovému „mikrovýběžku“. To umožňuje střídavý růst části čela trhliny mechanismem prostého módu II. V důsledku čárového napětí v čele trhliny a interakce dislokací, emitovaných ze sousedních segmentů mikrovýběžků, lze předpokládat vyšší rychlost šíření trhliny v místech prohlubní čela a nižší rychlost šíření na čelech výstupků. To vede k postupnému vyhlazování čela trhliny.



Obrázek 7: Schéma růstu trhliny v makroskopickém módu III mechanismem lokálního módu II na mikroskopicky křivolakém čele trhliny [3]

5 Kvantitativní fraktografie

Fraktografie je pojem, který poprvé použil Carl A. Zapffe roku 1944 pro proces popisné analýzy lomových povrchů [19]. Výstupem této analýzy je soubor číselných charakteristik vztažených k přítomným morfologickým znakům (jejich počet, tvar, rozměry, orientace a také distribuce těchto veličin) nebo k topografii povrchu obecně (parametry drsnosti). Přesnost zjištěných údajů je v obou případech podmíněna znalostí prostorových souřadnic bodů studovaného lomového povrchu. Výraznější rozvoj kvantitativní fraktografie nastal se vznikem a následným zdokonalováním měřících zařízení, rostoucí kapacitou výpočetní techniky a s vývojem příslušných algoritmů [20].

5.1 Některé experimentální výsledky šíření trhlin ve smykových módech

Většina experimentů zabývajících se smykovými módy byla prováděna pomocí cyklického krutu na vzorcích kruhového průřezu.

V hladkých vzorcích je hodnota maximální smykové složky napětí rovna normálovému napětí. Ve vzorcích opatřených obvodovým vrubem je růst trhliny stabilizován v rovině kolmé vůči ose vzorku. V kvazistatické a nízkocyklové únavové oblasti dominují smykové módy do konce životnosti vzorku. V těchto případech vytváří intenzivní cyklická deformace s velkou plastickou zónou (obepínající mnoho zrn a mikrostrukturních elementů) síť mikrotrhlin na hranicích zrn nebo na částicích sekundární fáze. Tato narušená zóna je dále rozšiřována v rovině trhliny [21].

Pokluda et al. [4] navrhli experimentální zařízení umožňující současně zatěžování vzorku v prostém módu II a III v oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy.

Všechna pozorování morfologie potvrzují, že prostý mód II a kombinace módů I+II jsou dominantní mikroskopický lomový mechanismus, způsobující přímý postup čela trhliny při zatížení v makroskopickém módu II v prahové oblasti.

Při rozvětvení trhliny byly pozorovány extrémně křivolaké povrchové trhliny šířící se směrem dovnitř vzorku podél roviny s maximálním tahovým napětím. Šíření v módu II bylo vždy podporováno módem I v důsledku šíření v rovinách téměř kolmých vůči rovinám s maximálním tahovým napětím vlivem natočení roviny trhliny.

5.2 Metody rekonstrukce morfologie lomových ploch

Studium morfologie lomové plochy těles porušených únavou poskytuje velmi mnoho informací o mikromechanismu únavového lomu. Na lomové ploše lze identifikovat místo iniciace trhliny, vymežit oblast jejího podkritického šíření i oblast náhlého dolomení. To je velmi cenné pro zjišťování příčin provozního lomu a účinnosti zpětných opatření ve výrobě a provozu k jejich odstranění. Lomovou plochu je nutno sledovat z makroskopického i mikroskopického pohledu. Při zvětšení, dosažených běžnými optickými přístroji (lupa, mikroskop) lze na reliéfu lomové plochy rozeznat místo iniciace únavové trhliny, oblast podkritického šíření i dolomení [2].

5.2.1 Metody pro měření povrchové topografie

Metody pro měření povrchové topografie lze zjednodušeně rozdělit do tří základních skupin: metody mechanické, metody optické a metody založené na jiných principech [22]. Nejvýznamnější mechanickou metodou je kontaktní profilometrie. Dotykový profilometr je

v principu tvořen $x-y$ stolkem a pohyblivým z -ramenem opatřeným snímačem s hrotem různé velikosti a tvaru, který je v průběhu měření v kontaktu s povrchem vzorku. Optické metody jsou založeny na jevech vznikajících při interakci povrchu s promítaným světelným paprskem. Jedná se například o změnu spektra, koherence nebo polarizační roviny. Mezi optické metody lze rovněž zařadit optickou profilometrii, při níž je fotograficky nebo digitálně nasnímán profil zviditelněný osvětlením lomové plochy úzkým světelným paprskem [23].

Základní metodou založenou na analýze snímků lomového povrchu je metoda známá jako stereofotogrametrie. V tomto případě jsou prostorové souřadnice povrchových bodů studované oblasti určeny na základě rozboru dvou snímků pořízených ze dvou různých snímacích pozic.

Numerické zpracování stereosnímků sestává ze dvou fází. V první z nich dochází k lokalizaci tzv. homologických bodů, tj. bodů reprezentujících v obou stereosnímkech tentýž reálný povrchový element, ve druhé fázi jsou pak pomocí stereologických relací vypočteny jejich relativní výškové souřadnice.

Optický profilometr

Optický profilometr využívá chromatickou vadu čoček tedy závislost ohniskové vzdálenosti na vlnové délce procházejícího světla [20, 24]. Fyzikální podstatou tohoto jevu je závislost indexu lomu na frekvenci světelného záření, který s rostoucí frekvencí nárůstá. Při průchodu bílého světla přes čočku nebo optickou soustavu, která nemá barevnou vadu korigovanou, dochází tedy k jeho rozkladu na jednotlivé vlnové délky.

Nejméně lámáno je dlouhovlnné záření, a je tedy průsečík červeného paprsku s optickou osou od čočky nejdále, zatímco krátkovlnné fialové paprsky jsou zaostřeny nejbližší. Po dopadu takto vzniklého světelného svazku na zkoumaný povrch jsou optimálně odraženy pouze zaostřené paprsky konkrétních vlnových délek, které tak nesou informace o lokální výšce měřené oblasti.

Pro vyhodnocení dat z *Microprof 100* bylo využito aplikací *proArea* a *profiler*, umožňujících mimo transformací dat nutných například při výpočtech diference mezi komplementárními profily (tj. translace, rotace a zrcadlení) také určení celé řady parametrů [20].

Parametry drsnosti

Podle popisného potenciálu lze v současnosti užívané parametry rozdělit do pěti hlavních kategorií. První dvě kategorie představují výškové a délkové parametry, které charakterizují vertikální a horizontální rozložení povrchových bodů. Třetí skupinou jsou spektrální parametry kvantifikující spektrální charakter povrchu. Pro kvantifikaci lomových ploch byly zvoleny následující parametry drsnosti. Největší výška R_p ($R_p = z_{max} - \langle z \rangle$) a největší hloubka R_v ($R_v = \langle z \rangle - z_{min}$), které jsou maximálními a minimálními hodnotami výškové souřadnice $\langle z \rangle$. Vertikální rozsah R_z ($R_z = z_{max} - z_{min}$) a střední aritmetická drsnost R_a .

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |z_i - \langle z \rangle|. \quad (1)$$

Z hybridních parametrů byly zvoleny lineární drsnost R_L a plošná drsnost R_A . Tyto bezrozměrné veličiny, někdy také nazývané relativní délka profilu a relativní plocha povrchu, jsou definovány jako [25]:

$$R_L = \frac{L}{L'}, \quad (2)$$

$$R_A = \frac{S}{S'}, \quad (3)$$

kde L je skutečná délka lomového profilu, S je skutečná plocha lomové plochy, L' je průmětna délky daného profilu a S' je průmětna plochy do makroskopické roviny.

6 Vývoj experimentu

Návrhem teoretického modelu Pokludy a Pippana [3], převracejícího dosavadní chápání šíření trhlin ve smykovém módu III, vyvstal požadavek na ověření tohoto modelu pomocí experimentu. Ve spolupráci s Erich Schmidt Institutem v Leobenu bylo navrženo unikátní experimentální zařízení, umožňující současné zatěžování vzorku ve smykových módech II a III. Přípravek byl navržen pro vzorky válcovitého tvaru s vnějším průměrem 8 mm později označované jako (S) vzorky. Tyto vzorky byly vyrobeny z austenitické oceli DIN 1.4301. Před samotným zatěžováním bylo třeba vytvořit ostrou trhlinu v kořeni vrubu tzv. pre-crack. Toho bylo dosaženo pomocí přípravku umožňujícího translační a rotační pohyb vzorku za současného působení ostří v kořeni vrubu. Proces vytváření iniciační trhliny byl dokončen stlačením vzorku silou 20 kN (statický pre-rack). Z důvodu nutnosti odstranění vnitřního pnutí, vytvořeného při tvorbě pre-cracku, byl vzorek žhán při teplotě 900°C po dobu jedné hodiny s následným pozvolným ochlazením na vzduchu.

Samotné zatěžování vzorků (S) pak probíhalo na rezonančním pulzátoru RUMUL frekvencí 100 Hz. Z důvodu potřeby zvětšení velikosti pozorované lomové plochy, obzvláště pak oblasti šíření trhliny, byly vyrobeny vzorky (L), jejichž vnitřní průřez byl přibližně 10x větší oproti stávajícím vzorkům (S). Použití těchto vzorků si vyžádalo výrobu nového typu přípravku umožňujícího současné zatěžování ve smykových módech II a III. Dolomení vzorků probíhalo pomocí cyklického tahového napětí s maximálním možným rozkmitem faktoru intenzity napětí $\Delta K_I \approx 33 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ pro danou geometrii vzorku na daném hydraulickém pulzátoru.

6.1 Použité metody pro kvantifikaci lomových ploch

První metodou pro kvantitativní vyhodnocení lomových ploch vzorků bylo použití optického profilometru, pomocí něhož bylo možno získat drsnostní profily v jednotlivých úsecích lomových ploch. Tyto profily byly poté zpracovány pomocí příslušného softwarového vybavení a statisticky vyhodnoceny. Zvoleným parametrem pro vyhodnocení lomových povrchů vytvořených šířením trhliny v módu II a v módu III byla autokorelační délka, u které byly patrné její rozdílné hodnoty u jednotlivých módů.

Další zvolenou metodou byla stereofotogrametrie [20], která je založena na rekonstrukci lomového reliéfu pomocí vytvořeného stereopáru. Relativní náklon byl volen na základě členitosti povrchu mezi 5° – 10°. Následná trojrozměrná rekonstrukce byla provedena numerickým zpracováním získaných stereopárů pomocí aplikace *MEX*. Výstupem stereofotogrametrických rekonstrukcí byly datové soubory obsahující prostorové souřadnice všech lokalizovaných homologických bodů. Kromě vlastní rekonstrukce povrchu umožňuje systém *MEX* provést také filtraci profilovou, plošnou a dokonce i objemovou s možností výpočtu základních, ale také několika pokročilejších parametrů drsnosti (např. fraktální dimenze a nosné křivky). Na základě této metody bylo možno stanovit délky šíření trhlin v jednotlivých smykových módech a následně vypočítat rychlost šíření trhlin pro dané rozkmity faktorů intenzity napětí ΔK .

7 Šíření smykových trhlin v prahové oblasti v austenitické oceli

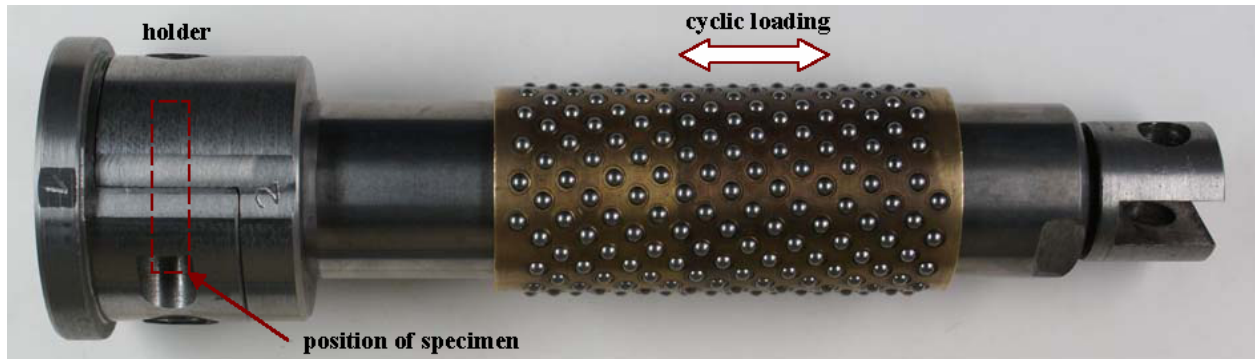
Cílem tvůrčí části mojí disertační práce bylo navrhnout experiment umožňující současné zatěžování vzorku ve smykových módech II a III a stanovení efektivních prahových hodnot rozkmitů faktorů intenzity napětí. Tedy navrhnout takový experimentální postup, který by omezil vliv stínících mechanismů vznikajících při šíření trhliny. Následná data je možné poté aplikovat na teoretické modely s podporou molekulární dynamiky a ab initio výpočtů.

7.1 Použité vzorky a přípravky

V případě zatěžování vzorků v oblasti vysokocyklové únavy je posunutí mnohem menší než v případě nízkocyklové únavy. V důsledku toho se v případě vysokocyklové únavy projevuje mnohem výrazněji vliv superpozice módu I. Pro zatěžování válcovitých vzorků s obvodovým vrubem byla navržena dvě originální testovací zařízení umožňující současné namáhání v módu II a III. Konstrukce držáku je orientována tak, že vzorek je namáhán „nahore“ a „dole“ v zátěžném módu II, „vpředu“ a „vzadu“ v zátěžném módu III. Obvodový vrub byl vytvořen pomocí soustružnického nože uprostřed vzorku.

Pro vytvoření počáteční trhliny bylo použito zařízení umožňující translační a rotační pohyby vzorku, za současného působení ostří v kořeni vrubu. Pro experimenty byla použita ocel X5CrNi 18-10 známá rovněž pod označením DIN 1.4301.

První zařízení, určené pro zatěžování malých vzorků (S) s vnějším průměrem 8 mm a vnitřním průměrem 4 mm, je znázorněno na obr. 8.

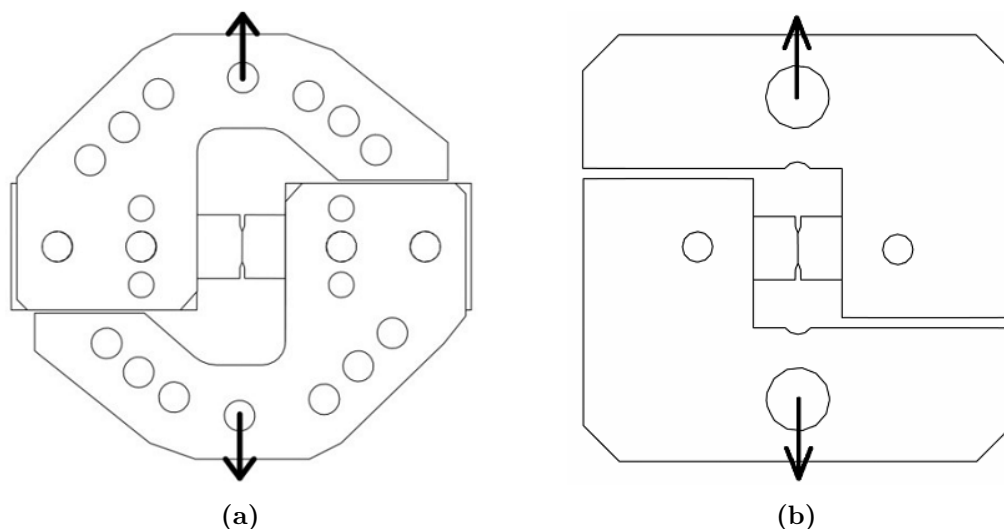


Obrázek 8: Přípravek pro zatěžování (S) vzorků

Proces vytváření ostré počáteční trhliny byl dokončen stlačením vzorku silou 20 kN a žlhaním na relaxaci vnitřního pnutí. Pět vzorků vyrobených z austenitické oceli bylo zatěžováno rozkmitem smykového napětí 180 MPa s asymetrií cyklu $R = 0,1$.

Před samotným dolomením pomocí cyklického tahového napětí ($\Delta\sigma = 200$ MPa, $R = 0,1$) byly vzorky umístěny do pece za účelem zbarvení oblasti šíření trhliny (nově vzniklý povrch po smykovém zatěžování) teplotní metodou tzv. heat tinting.

Druhé zařízení bylo navrženo pro velké vzorky (L) o vnějším průměru 25 mm a vnitřním průměru 12 mm (obr. 9). V případě pěti vzorků byla iniciační trhlina vytvořena pouze stlačením silou 200 kN (staticky). Vzorky s takto vytvořenou iniciační trhlinou byly poté zatěžovány smykovým napětím $\Delta\tau_n$ ($R = 0,1$): 160 MPa (2 vzorky), 200 MPa (2 vzorky) a 220 MPa (1 vzorek).



Obrázek 9: a) Schéma zatěžovacího zařízení pro vzorky s průměrem 25 mm s naznačeným směrem zatěžování b) novější varianta stejného přípravku

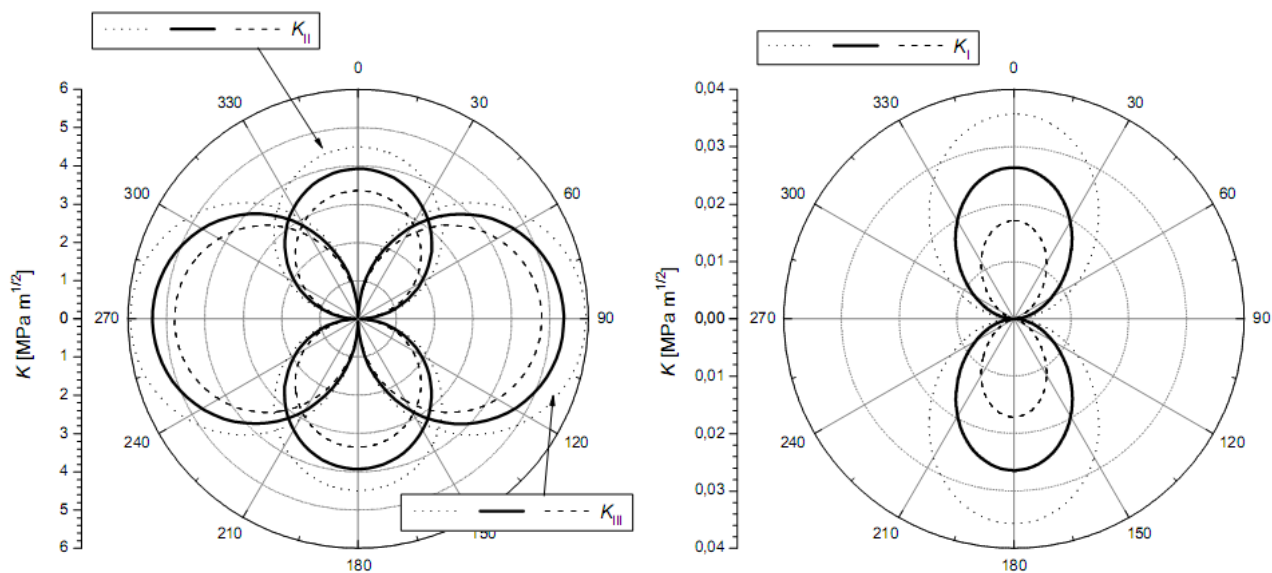
Stejným zařízením bylo dále zatíženo 12 vzorků s iniciační trhlinou vytvořenou cyklickým tlakem s rozkmitem smykového napětí v intervalu $\Delta\tau_n$ ($R = 0,1$): 70 MPa - 200 MPa. Iniciační trhliny byly vytvořeny na hydraulickém pulsátoru opatřeném speciálním prstenem, který eliminoval posun vzorku mimo osu zatěžování a vznik ohybového momentu, tedy asymetrie délek iniciačních trhlín. Pro jejich vytvoření byl vzorek nejprve zatížen rozkmitem faktoru intenzity napětí $\Delta K_I = 25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ s parametrem asymetrie cyklu $R = 20$ a počtem cyklů $N = 25\,000$. Pro odstranění vnitřního pnutí byly vzorky následně vyžehány při teplotě $T = 900^\circ$ po dobu $t = 1$ hod.

Všechny vzorky byly po zatížení dolomeny cyklickým tahovým napětím se stejnými parametry jako vzorky s iniciační trhlinou vytvořenou statickým tlakem.

7.2 K-kalibrace vzorků

Pro stanovení hodnot faktoru intenzity napětí na čele obvodové trhliny byl vytvořen model v programu ANSYS [26]. Nejprve bylo určeno napětově-deformační pole podél čela trhliny vytvořené smykovým napětím 200 MPa využitím hrubé konečnoprvkové sítě. V dalším kroku byl vytvořen submodel s velmi jemnou konečnoprvkovou sítí obsahující pouze oblast iniciační trhliny, která byla vyříznuta z hrubého modelu.

Rozložení faktoru intenzity napětí v módu I, II a III v průřezu vzorku s vnitřním průměrem 4 mm zatěžovaného smykovým napětím $\tau_n = 180$ MPa je znázorněno v polárním diagramu (obr. 10). Tečkovaná křivka odpovídá řešení pomocí vrcholových uzlů, zatímco čárkovaná vyznačuje řešení s využitím středových uzlů, plná čára odpovídá střední hodnotě. Z výsledku analýzy vyplynul poměr $K_{III\max}/K_{II\max} = 1,37$, při současně zanedbatelné hodnotě $K_{I\max}$.



Obrázek 10: Rozložení hodnot faktoru intenzity napětí na čele trhliny v polárních souřadnicích v kruhovém průřezu vzorku [26]

7.3 Rekonstrukce lomových povrchů

Pro kvantitativní vyhodnocení lomových ploch vytvořených šířením v módech II a III bylo jako první využito autokorelační funkce. Dva vzorky (S) byly zatěžovány rozkmitem amplitudy napětí τ_a a koeficientem asymetrie cyklu $R = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}} = 0,1$. Oba experimenty byly přerušeny po 380 000 cyklech a poté byly dolomeny pomocí cyklického tahového napětí.

Střední hodnoty autokorelačních délek s příslušnými směrodatnými odchylkami jsou uvedeny v tab. 1. Je zde patrný rozdíl hodnot korelačních délek β profilů orientovaných paralelně k rostoucímu čelu trhliny (v tab. 1 znázorněny tučně). V případě profilů kolmých vůči čelu trhliny jsou hodnoty korelačních délek v obou smykových módech podobné.

Tabulka 1: Korelační délka, β

mode	profiles	β
II	x	152±3
	y	111±6
III	x	108±12
	y	85±3

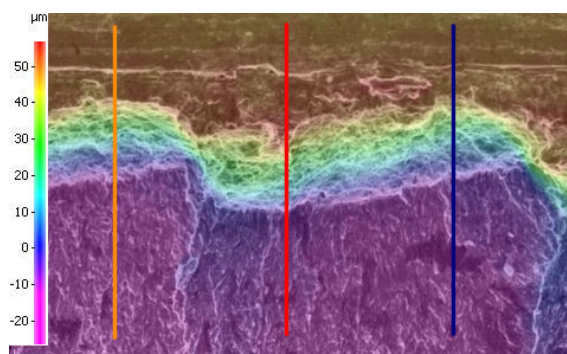
V případě iniciační trhliny vytvořené cyklickým tlakovým namáháním skutečně došlo ke zjemnění okolí čela trhliny, což dokládají naměřené hodnoty zvolených drsnostních parametrů (tab. 2) a výškových profilů. Tento parametr je zejména vhodný pro popis makroskopické drsnosti lomových ploch [23].

Tabulka 2: Vybrané drsnostní parametry iniciační trhliny

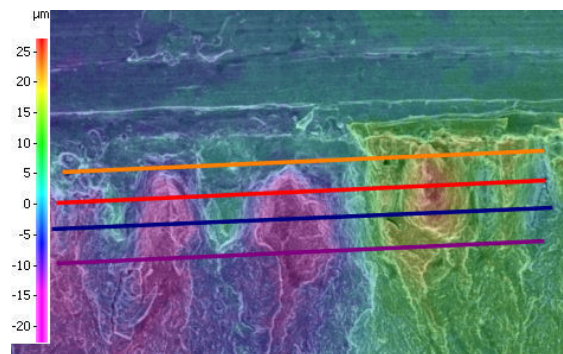
	R_q [μm]	R_L [-]	R_V [-]
statický pre-crack	2,15±1,15	1,27±0,6	0,57±0,7
cyklický pre-crack	0,87±0,4	1,08±0,03	0,32±0,08

Při šíření únavové trhliny v módu II bylo pozorováno vybočení do módu I, kdy směr vybočení byl definován navrženým mechanismem. Mechanismus předpokládá vybočení trhliny směrem, ve kterém bude trhlina působením tahového napětí otevírána.

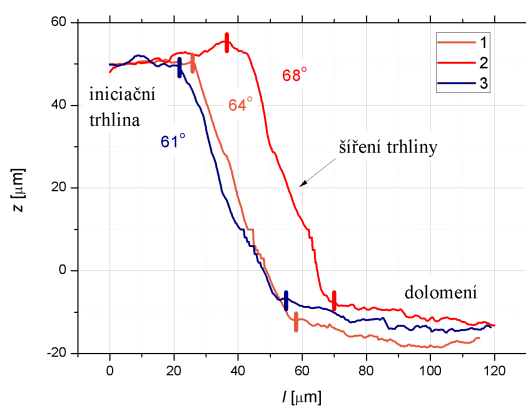
Morfologie lomové plochy a lokální topologické profily šíření trhliny jak v módu II, tak v módu III poblíž čela iniciační trhliny rekonstruované pomocí stereofotogrametrie jsou zobrazeny na obr. 11. Ze snímků je patrný rozdíl v topologii šíření v módech II a III. Všechny trhliny šířící se v módu II byly nakloněny vůči smykové rovině [27].



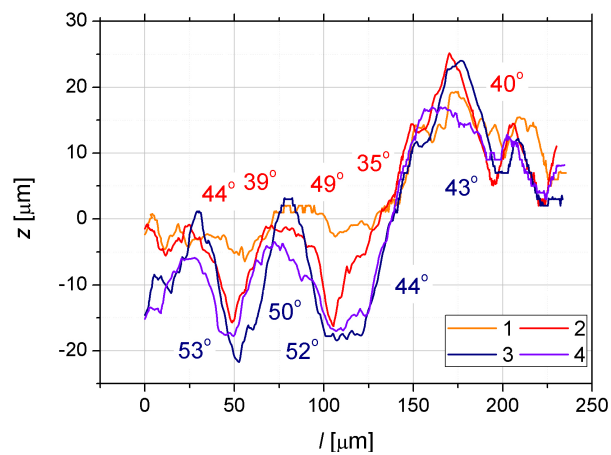
(a)



(b)



(c)



(d)

Obrázek 11: Barevné mapy a výškové profily šířící se trhliny v módu II (vlevo) a módu III (vpravo)

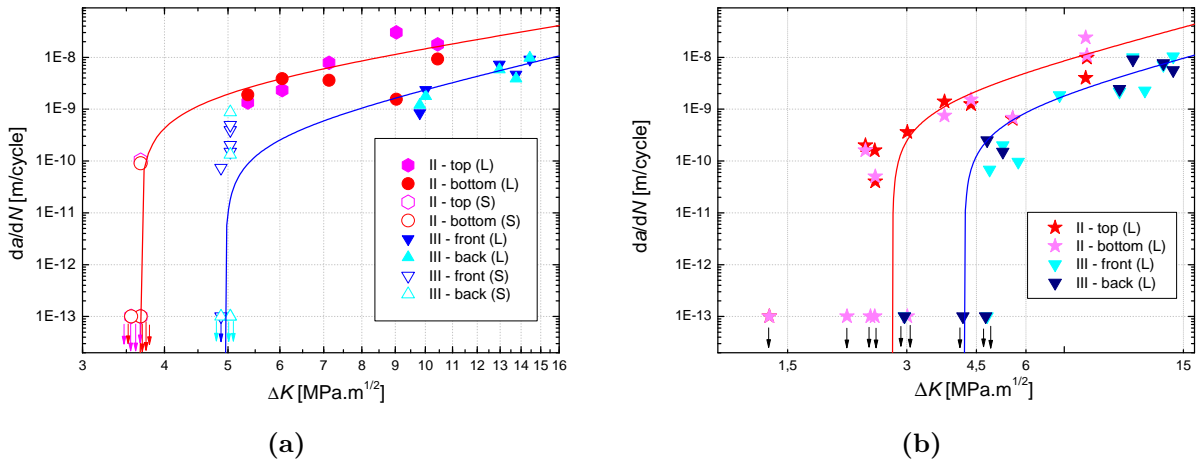
7.3.1 Stanovení efektivních prahových hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí $\Delta K_{eff,th}$

Poněvadž délka šířící se trhliny ve smykových módech byla mnohem menší než počáteční trhlina spolu s vrubem, je možné předpokládat konstantní rychlost šíření trhliny. Rychlost šíření je tak možno jednoduše vypočíst dělením celkové délky šířící se trhliny příslušným počtem cyklů. Křivky rychlosti šíření v oblasti blízké prahové hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí jsou pro vzorky s trhlinou vytvořenou statickým tlakem znázorněny na obr. 12a. Regresní křivky odpovídají rovnici Klesnila a Lukáše [28]:

$$\frac{da}{dn} = A(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m), \quad (4)$$

Na základě této regrese byly stanoveny prahové hodnoty faktoru intenzity napětí pro vzorky s iniciační trhlinou vytvořené statickým tlakem ve smykových módech. Pro smykový mód II byla tato hodnota $\Delta K_{IIth} = 3,67 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ a pro smykový mód III $\Delta K_{IIIth} = 4,95 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$. Všechny trhliny se šířily v lokálním módu I odklonem čela trhliny v módu II nebo tvorbou factory-roofs v módu III.

V případě vzorků s iniciační trhlinou vytvořenou cyklickým tlakem byla prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí v módu II rovna $\Delta K_{IIth} = 2,76 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ a v módu III rovna $\Delta K_{IIIth} = 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$. Tvar v-K křivky vzorků s iniciační trhlinou vytvořenou cyklickým tlakem je znázorněna na obr. 12b.



Obrázek 12: Průběh v-K křivek s iniciační trhlinou vytvořenou a) statickým tlakem b) cyklickým tlakem

V případě vzorků s iniciační trhlinou vytvořenou statickým tlakem tak nebylo možno zcela zanedbat složku smykového zavírání trhliny ΔK_{cl} indukovanou drsností lomových ploch. Získané hodnoty prahových hodnot rozkmitů faktorů intenzity jsou tedy vyšší o hodnotu ΔK_{cl} oproti efektivním prahovým hodnotám ($\Delta K_{th} = \Delta K_{eff,th} + \Delta K_{cl}$) [25].

8 Diskuze výsledků

V případě prvního modelu [29,30] vychází šíření únavové trhliny z předpokladu vzniku nových povrchů v důsledku deformace a následného skluzu dislokací na volný povrch. Trhlina se šíří vytvářením nového lomového povrchu otupením během zatěžování a opětovným zaostřením počas odtížení. Mechanismus je podobný modelům navržených autory Pelloux [31] a Neumann [32], resp. modelům založených na přímém pozorování šířící se trhliny při větších rychlostech šíření [33,34].

Podle deformačního modelu dochází u módu II k emisi dislokací na čele trhliny a k tvorbě nových povrchů. Trhlina by se měla přednostně šířit v módu II s malým odklonem směru. Tento směr je dán rozložením tahového napětí na jejím čele počas zatížení. Daná odchylka směru vede k otevírání trhliny během zatížení a brání tak uzavírání trhliny a tření na jejím čele.

V případě módu III je vysvětlení komplikovanější než je tomu u módu II. V ideálním deformačním modelu [30] je skluzová rovina sřoubových dislokací koplanární s rovinou trhliny a jejich Burgersův vektor je rovnoběžný s čelem trhliny. Je-li čelo trhliny zatíženo v módu III nedochází k jejímu šíření, jelikož deformace tvořená dislokacemi s Burgersovým vektorem rovnoběžným čelem trhliny nevytváří nové povrchy před čelem trhliny. Nicméně tento předpoklad je velmi nepravděpodobný, jelikož Burgersův vektor bude mít vždy složku ve směru šíření trhliny. Z tohoto důvodu není na čele trhliny v módu III pouze deformace v módu III, ale rovněž skluzový posuv v módu II, který vede ke tvorbě nových povrchů. Následné odchylky od ideálně rovného čela trhliny jsou dalším důvodem, proč šíření v módu III vytváří nové povrchy.

Deformační i dekohezní model šíření trhliny byly navrženy za předpokladu rovinného 2D uspořádání tělesa s trhlinou [30]. V případě reálného prostorového uspořádání, tj. při emisi dislokací na odkloněné a zejména natočené rovině, dochází k vzájemnému přiblížení obou modelů. Někdy dokonce mohou emitované dislokace produkovat anti-stínící dislokace a spustit tak proces dekoheze.

9 Závěr

Za účelem stanovení efektivních prahových hodnot faktorů intenzity napětí a rychlostí šíření trhliny ve smykových módech II a III byla použita dvě experimentální zařízení a kruhové vzorky dvou různých průměrů, opatřené obvodovým vrubem. V případě zatížení vzorků prostým smykem s iniciační trhlinou vytvořenou statickým tlakem docházelo k vyhnutí (v případě módu II), resp. natočení (v případě módu III) šířící se trhliny do módu I.

Znalost problematiky šíření smykových únavových trhlin je důležitá při realizaci řady konstrukčních součástí, jež jsou zatěžovány nejrůznějšími kombinacemi zátěžných módů. Příkladem takto zatěžovaných součástí mohou být hřídele, potrubí, popř. valivá ložiska, která pracující za vysokých rychlostí.

Byly získány efektivní prahové hodnoty rozkmitů faktorů intenzity napětí $\Delta K_{IIeff,th} = 2,76 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ a $\Delta K_{IIIeff,th} = 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$. Tento rozdíl odpovídá predikci podle modelu Pokludy a Pippana [3].

Mikromechanismy šíření trhlin ve smykových módech II a III jsou zcela odlišné. V případě vzorků s obvodovým vrubem zatěžovaných v oblasti vysokocyklové únavy byl v oblastech zatěžovaných v módu III pozorován vznik tzv. factory-roofs jako důsledek natočení šířící se trhliny do módu I. Tento nejpravděpodobnější mikromechanismus šíření v módu III byl již pozorován i u jiných ocelí [25, 35].

Na základě získaných poznatků bylo zjištěno, že šíření trhliny ve smykových módech II a III v austenitické oceli se řídí dekohezním modelem. Znalost fenomenologického a matematického popisu v-K křivek je důležitá z hlediska predikce zbytkové životnosti součástí s trhlinami. Separace stínění od celkové hodnoty lomové houževnatosti pomocí teoretických modelů poskytuje mnohem přesnější obraz o skutečné (inherentní) rezistenci materiálu vůči šíření trhlin. Naopak jeho nerespektování může vést k přecenění odolnosti a kvality materiálu [36].

Reference

- [1] Suresh, S., *Fatigue of Materials 2nd edition*. Cambridge University Press, 1998.
- [2] Pokluda, J., Kroupa, F., Obdržálek, L., *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. PC-DIR, 1994.
- [3] Pokluda, J., Pippan, R., Can a pure mode III fatigue loading contribute to crack propagation in metallic materials?, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, ročník 28, s. 179 – 186, 2005.
- [4] Pokluda, J., Trattning, G., Martinschitz, C., Pippan, R., Straightforward comparison of fatigue crack growth under modes II and III, *International Journal of Fatigue*, ročník 30, s. 1498 – 1506, 2008.
- [5] Hellier, A. K., McGirr, M. B., Cordero, D. J. H., Kutajczyk, L. A., Fatigue of head-hardened rail steel under mode III loading, *International Journal of Fracture*, ročník 42, s. R19 – R23, 1990.
- [6] Tschegg, E.K., Suresh, S., Mode III fracture of 4340 steel: effects of tempering temperature and fracture surface interference, *Metallurgical Transaction*, ročník 19A, s. 3035 – 3044, 1988.
- [7] Pook, L. P., *Crack Paths*. Wit Press Southampton, 2002.
- [8] Vojtek, T., Pokluda, J., Hohenwarter, A., Pippan, R., Tree-dimensional morphology of fracture surfaces generated by mode II and III fatigue loading in ferrite and austenite, *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, (submitted).
- [9] Wöhler, A., Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen, *Zeitschrift für Bauwesen*, ročník 10, s. 583 – 616, 1860.
- [10] Dowling, N. E., *Mechanical behaviour of materials*. Prentice Hall, 1993.
- [11] Rösler, J., Harders, H., Bäker, M., *Mechanical behaviour of engineering materials*. Springer, 2007.
- [12] Murakami, Y., *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions*. Elsevier, 2002.
- [13] Pokluda, J., Stabilita a šíření únavových trhlin se strukturně indukovanou mikrogeometrií, In *Letná škola únavy materiálů 2000*, Bokůvka, O., Palček, P., Puškár, A., (eds), 2000.
- [14] Pokluda, J., Šíření a zastavování únavových trhlin, In *Letná škola únavy materiálů*, Chaloupková, M., Töröková, (eds). Žilina: Edis, 2004, s. 25 – 32.
- [15] Paris, P.C., Sih G.C., Stress analysis of cracks, *Fracture toughness testing and its application*, s. 30 – 81, 1965.
- [16] Deshpande, V.S., Needleman, A., Van der Giessen, E., A discrete dislocation analysis of near-threshold fatigue crack growth, *Acta Materialia*, ročník 49, s. 3189 – 3203, 2001.

- [17] Van der Giessen, E., Deshpande, V., Cleveringa, H.H.M., Needleman, A., Discrete dislocation plasticity and crack tip fields in single crystals, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, ročník 49, s. 2133 – 2153, 2001.
- [18] Van der Giessen, E., Needleman A., Discrete dislocation plasticity: a simple planar model, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, ročník 3, s. 689 – 735, 1995.
- [19] Zapffe, C.A., Glogg, M.Jr., Fractography-a new tool for metallurgical research, *Trans ASM*, ročník 34, s. 71–97, 1945.
- [20] Slámečka, K., Kvantitativní fraktografie biaxiálních únavových lomů, Dizertační práce, VUT v Brně, 2006.
- [21] Tanaka, K, Crack propagation in lead-free solder under cyclic loading of mode I and II, In *Crack Paths*, Atzori, B., Carpinteri, A., Lazzatin, P., Pook, L.P., (eds), 2009.
- [22] Bumbálek, B., Oštádal, V., *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989.
- [23] Underwood, E.E., Banerjee, K., Quantitative fractography, In *ASM Handbook*. ASM International, 1992.
- [24] Mazurek, A., *Základy praktické optiky I*. Nakladatelství Práce Praha, 1950.
- [25] Pokluda, J., Šandera, P., *Micromechanisms of fracture and fatigue in a multiscale context*. Springer - Verlag London lmd, 2010.
- [26] Horníková J., Šandera P. a Pokluda J., Stress intensity factors for surface semi-elliptical crack in cylindrical specimen under combined torsion and axial compression, *Key Engineering Materials*, ročník 452 - 453, s. 673 – 676, 2011.
- [27] Holáň, L., Pokluda J., Slámečka, K., Local aspects of shear-mode crack propagation in austenitic steel, *Chemické listy*, 2010, přijato k publikaci.
- [28] Klesnil, L., Lukáš, P., *Fatigue of metallic materials*. Elsevier, Oxford, 1980.
- [29] Pippan, R., Dislocation emission and fatigue crack growth threshold, *Acta Metallurgica et Materialia*, ročník 39, s. 255 – 262, 1991.
- [30] Riemelmoser, F.O., Gumbsch, P., Pippan, R., Dislocation modelling of fatigue crack: an overview, *Materials Transactions*, ročník 42, s. 2 – 13, 2001.
- [31] Pelloux, R.M.N., Crack extension by alternating shear, *Engineering Fracture Mechanics*, ročník 1, s. 697 – 704, 1970.
- [32] Neumann, P., New experiments concerning the slip processes at propagating fatigue cracks —I, *Acta Metallurgica*, ročník 9, s. 1155 – 1165, 1974.
- [33] Vehoff, H., Neumann, P., Crack propagation and cleavage initiation in Fe-2,6%-Si single crystals under controlled plastic crack tip opening rate in various gaseous environments, *Acta Metallurgica*, ročník 28, s. 265 – 272, 1980.

- [34] Pippin, R., Zelger, C., Gach, E., Bichler, C., Weinhandl, H., On the mechanism of fatigue crack propagation in ductile metallic materials, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, ročník 34, s. 1 – 16, 2011.
- [35] Pokluda, J., Slámečka, K., Šandera, P., Mechanism of factory-roof formation, *Engineering Fracture Mechanics*, ročník 77, s. 1763 – 1771, 2010.
- [36] Pokluda, J., Stabilita rozvětvených trhlin v konstrukčních materiálech, In *Materiálové vědy na prahu 3. milénia*, Švejcár, J., (eds). Brno: FSI VUT v Brně, 1999, str. 104.

Vlastní publikace autora

- [I] Holáň, L., Hohenwarter, A., Slámečka, K., Pippan, R., Pokluda J., Experimental evaluation of fatigue long crack propagation under remote shear loading modes II and III, *Material Science and Technology*, ročník 8, číslo 4, s. 55 - 59, 2008.
- [II] Holáň, L., Pokluda J., Slámečka, K., Local aspects of shear-mode crack propagation in austenitic steel, *Chemické listy*, ročník 104, číslo 15, s. 314 - 317, 2010.
- [III] Vojtek, T., Pippan, R., Hohenwarter A., Holáň, L., Pokluda J. Near-threshold propagation of mode II and mode III fatigue cracks in ferrite and austenite, *Acta materialia*, ročník 61, číslo 12, s. 4625 - 4635, 2013.
- [IV] Holáň, L., Hohenwarter, A., Slámečka, K., Horníková, J., Pippan, R., Pokluda J., On the fatigue crack propagation under shear loading modes. In *Víceúrovňový design pokrokových materiálů 08*, Dlouhý, I., Švejcar, J., Šob M., Strnadel, B. (eds), ÚFM AV ČR, Brno 2008, s. 151 - 158.
- [V] Holáň, L., Major, Š., Slámečka, K., Horníková, J., Pokluda J., Fatigue long crack propagation in austenitic steel under remote loading modes II and III. In *FSI Junior konference 2008*, Ptáčková, I., (eds), VUTIUM, Brno 2009, s. 49 - 55.
- [VI] Holáň, L., Pokluda J., Slámečka, Local aspects of shear-mode crack propagation in austenitic steel. In *Víceúrovňový design pokrokových materiálů 09*, Dlouhý, I., Švejcar, J. (eds), ÚFM AV ČR, Brno 2009, s. 123 - 130.
- [VII] Holáň, L., Pokluda J., Pippan, R., Mikromechanismy šíření únavových trhlin ve smykových módech v austenitické oceli. In *Víceúrovňový design pokrokových materiálů 10*, Dlouhý, I., Švejcar, J., (eds), ÚFM AV ČR, Brno 2010, s. 107 - 114.
- [VIII] Holáň, L., Hohenwarter, A., Slámečka, K., Pippan, R., Pokluda J., On the micromechanisms of fatigue long crack growth under remote shear loading modes. In *Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures (ECF17)*, Pokluda, J., Lukáš, P., Šandera, P., Dlouhý, I., (eds), Vutium, Brno 2008, s. 2437 - 2442.
- [IX] Holáň, L., Hohenwarter, A., Slámečka, K., Pippan, R., Pokluda J., Quantitative fractography of fatigue long crack growth under remote shear loading modes. In *25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, CTU Prague 2008, s. 87 - 88.
- [X] Holáň, L., Pippan, R., Pokluda J., Hohenwarter, A., Slámečka, K., Near-threshold propagation of mode II and mode III cracks. In *Crack Path (CP2009)*, Atzori, B., Carpinteri, A., Lazzarin, P., Pook, L.P., University of Padue, Vicenza, Itálie 2009, s. 585 - 592.

Libor Holář

Curriculum Vitae

Osobní údaje

Datum a místo narození: 25. 5. 1980, Uherské Hradiště.

Adresa trvalého bydliště: Kyjovská 712, 687 09 Boršice.

Dosažené vzdělání

2006 – dosud: doktorské studium oboru Fyzikální a materiálové inženýrství na FSI VUT v Brně.

2000 – 2006: obor magisterského studia Nové technické materiály na FMMI VŠB-TU v Ostravě ukončený diplomovou prací „Studium Kirkendalova jevu na svarovém spoji Ni3Al/Ni“.

1995 – 1999: Střední průmyslová škola, Uherské Hradiště ukončený maturitou.

Zaměstnání a pedagogická činnost

únor 2012 – dosud: Inženýr ve vývoji, Robert Bosch České Budějovice, spol. s.r.o.

2006 – 2010: výuka laboratorních cvičení z předmětů „Fyzika I a II“.

Další projekty a zkušenosti

2006 – 2010 10-ti měsíční stáž na Erich Schmid Institute of Materials Science, Leoben.

2008 – 2010 účast v projektu Víceúrovňový design pokrokových materiálů.

2009: úspěšně obhájěn grant FSI VUT v Brně.

2008, 2009: úspěšně obhájěn FRVŠ grant.

2004 – 2005 roční studijní pobyt na TU Bergakademie Freiberg (projekt Socrates-Erasmus).

Jazykové znalosti

Anglický jazyk – aktivní znalost slovem i písmem.

Německý jazyk – aktivní znalost slovem i písmem.

Odborné znalosti

Únava materiálu při smykových zátěžních módech, kvantitativní analýza lomových ploch, experimentální stanovení efektivních prahových hodnot rozkmitů faktorů intenzity napětí.

Abstract

This work is focused on the realization of experiment allowing simultaneous loading under modes II and III in a single cylindrical specimen. The proposed experiment allowed to minimize crack closure during the cyclic loading and obtained values of thresholds of stress intensity range can be considered to be very close to effective values. This was attained by means of unique experimental devices and procedure of preparation of pre-crack of specimen with circumferential notch, which was made of stainless austenitic steel. The obtained values can be compared with theoretical models with the support of molecular dynamics and ab-initio calculation. In order to identify the ratio of mode II and mode III stress intensity factors at the crack tip, a numerical analysis by means of the *ANSYS* code was performed.

Based on observation it was found out, that fatigue crack propagation is controlled by decohesion model in austenitic steel. The morphology of fracture surfaces was studied by means of optical chromatography and 3D stereophotogrammetry, which allowed a comparison of created morphology under shear modes II and III. Two significantly different aspects of crack growth under shear modes II and III were observed.

Morphology of pre-crack was also studied by means of selected roughness parameters. Calculations were performed using the commercial system *MeX* and the application *Profiler*, which is an important outcome of this work. The mechanism of deflection (kink) of crack growth under mode II was defined.