

CHOVÁNÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN ZATĚŽOVANÝCH V MÓDECH II A III V PRAHOVÉ OBLASTI V KOVECH

Tomáš VOJTEK^{A, B}

^A Ústav fyzikálního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, CZ

^B Středoevropský technologický institut (CEITEC), Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, CZ, e-mail: tomas.vojtek@ceitec.vutbr.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá prahovou oblastí šíření únavových trhlin v módech II a III. Jsou prezentovány experimenty prováděné na feritické oceli, austenitické oceli, titanu a niklu. Pro tyto materiály jsou uvedeny naměřené efektivní prahové hodnoty pro šíření trhlin v módech I, II a III, srovnání těchto hodnot s teoretickými modely a diskuze nad fyzikálními mechanismy, které vedou k různému chování těchto trhlin z hlediska jejich směru šíření a složitosti geometrie lomových ploch.

Klíčová slova: únava, módy II a III, prahová hodnota, stínění čela trhliny

Úvod

Únava materiálu pod cyklickým zatěžováním patří stále k nejčtenějším případům poškození materiálu konstrukčních součástí. Únavové poškození má fázi trvalých změn ve struktuře materiálu, fázi iniciace trhliny, fázi stabilního šíření trhliny a fázi nestabilního dolomu. V praxi je nejdelší časový úsek životnosti během prvních dvou fází, ale také během šíření krátké trhliny v oblasti prahových hodnot. [1]

Důležitým parametrem pro technické aplikace je mez únavy, tedy zatížení, pod kterým vůbec nedojde k iniciaci trhlin. V mnoha případech ale konstrukce mohou plnit funkci i s přítomností krátkých trhlin. Pro tento případ je důležitou veličinou prahová hodnota zatížení pro šíření trhliny (prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí). Často dochází k iniciaci trhliny, která roste jen krátce (do 1 mm) a poté se zastaví. Důvodem je pokles efektivního zatížení špice trhliny.

Efektivní a stínící složka zatížení trhliny

Existují dvě složky zatížení trhliny. První složka cyklicky rozevívá a zavírá čelo trhliny a je vlastní hnací silou pro šíření trhliny. Odpor proti této složce je čistě inherentní vlastnost materiálu daná vazbami mezi atomy. Odpovídající složka zatížení je efektivní hodnota zatížení trhliny (rozkmitu faktoru intenzity napětí) [2].

Kromě této složky existuje dodatečná složka, která oslabuje vnější zatížení trhliny, a která se „spotřebuje“ na interakci mezi lomovými plochami, překonání zbytkových napětí po plastické deformaci a další vlivy, které jsou souhrnně nazývány jako stínění čela trhliny. Vnější aplikované zatížení trhliny je tedy složeno ze dvou členů

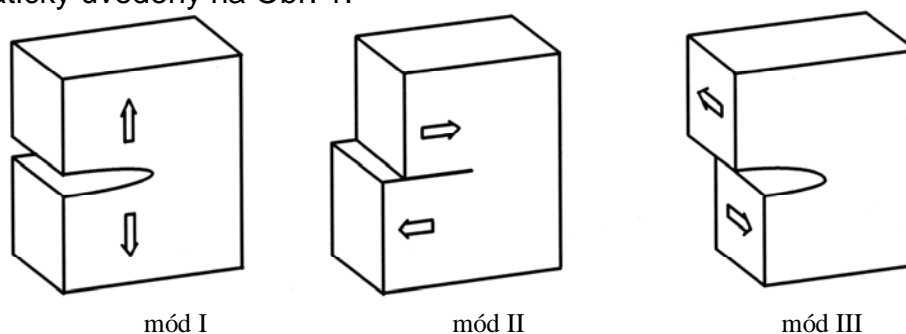
$$\Delta K_{\text{aplikované}} = \Delta K_{\text{efektivní}} + \Delta K_{\text{stínění}}$$

Jestliže je faktor intenzity napětí počítán pro ideálně rovnou trhlínu např. metodou konečných prvků, tento výpočet nezahrnuje stínění trhliny a je tedy konzervativní.

Prahová hodnota pro šíření trhliny má také svou efektivní složku, která představuje teoretický limit pro zatížení, pod kterým trhlina nikdy neporooste.

Složka stínění způsobí, že ve skutečnosti je prahová hodnota o něco vyšší. Bezprostředně po iniciaci trhliny je délka trhliny malá a stínící složka je zanedbatelná. Proto se trhlina krátce šíří, poté začne stínící složka narůstat až do chvíle, kdy aplikované zatížení nebude pro šíření stačit. Prahovou hodnotu pro šíření únavových trhlin tedy nelze považovat za konstantu. Její velikost závisí na délce trhliny, parametru asymetrie cyklu ($R = F_{\min}/F_{\max}$) a dalších vlivech.

Po zvýšení vnějšího zatížení se situace se zastavováním trhliny může opakovat a v případě dlouhých trhlin v konstrukci může stínící složka dosahovat značných hodnot. Pro trhliny zatěžované v módech II nebo III může být i několikanásobně větší než je efektivní prahová hodnota, protože vzniklé lomové plochy se od sebe nevzdalují. Otvírací mód I a smykové módy II a III jsou schematicky uvedeny na Obr. 1.



Obr. 1: Znárodnění zátěžných módů trhliny.

Vyčíslení stínící složky je často velmi obtížné, obzvláště v případech zatěžování v módech II a III. Vyčíslení efektivní složky je možné a tato složka je také důležitá při snaze o pochopení fyzikálního mechanismu vlastního odporu materiálu proti šíření trhliny.

Ze znalosti efektivních hodnot a aplikovaného zatížení lze dopočítat stínící složku

$$\Delta K_{\text{stínění}} = \Delta K_{\text{aplikované}} - \Delta K_{\text{efektivní}}$$

a tím pro konkrétní případ rozhodnout, jak velký je význam jednotlivých složek a jaký je nevhodnější způsob zvýšení odolnosti proti šíření trhliny.

Například, budeme-li zatěžovat válec s obvodovou trhlinou v krutu (mód III), je možné, že naměříme prahovou hodnotu, pod kterou se trhlina nešíří a součást je stále provozuschopná, např. $\Delta K_{\text{III,th}} = 7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Přitom efektivní prahová hodnota pro šíření v módu III pro austenitickou ocel je $\Delta K_{\text{III,th,eff}} = 2,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (viz dále). Změna ΔK o jednotky $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ obvykle znamená změnu rychlosti šíření trhliny o řád. Z toho je zřejmé, že stínící efekty, zejména interakce mezi lomovými plochami při zatěžování v módu III, mohou být pro životnost součásti důležitější než samotná odolnost materiálu proti šíření trhliny.

Stínění čela trhliny v módech II a III

V případě smykových módů II a III je pro stínící složku nejvýznamnější drsnost lomových ploch, tedy směry, kterými se trhlina šíří. To závisí do jisté míry na struktuře materiálu. Vliv struktury materiálu se projeví v tom, zda-li se materiál lokálně porušuje v tahu (dekohezí) nebo ve smyku (skluzem).

Jestliže se materiál porušuje pod maximálním tahovým napětím, pak trhliny zatěžované v módu II nebo III budou mít tendenci se lokálně odklánět a natáčet tak, aby byly otvírány v módu I. Tím se výrazně bude komplikovat jejich geometrie, zvýší se drsnost lomových ploch a stínění špičky trhliny. V případě, že

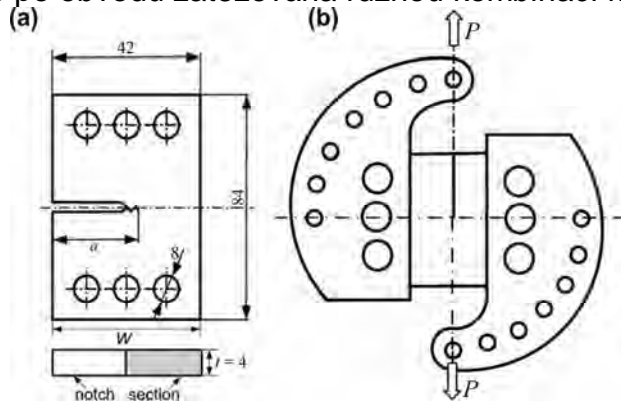
materiál podléhá porušení pod maximálním smykovým napětím, bude se trhlina šířit v rovině maximálního smyku. Pro trhliny zatěžované v módech II a III to znamená, že směr jejich šíření zůstane v rovině a drsnost lomových ploch a stínění špiče trhliny budou malé. [3, 4]

Experimenty

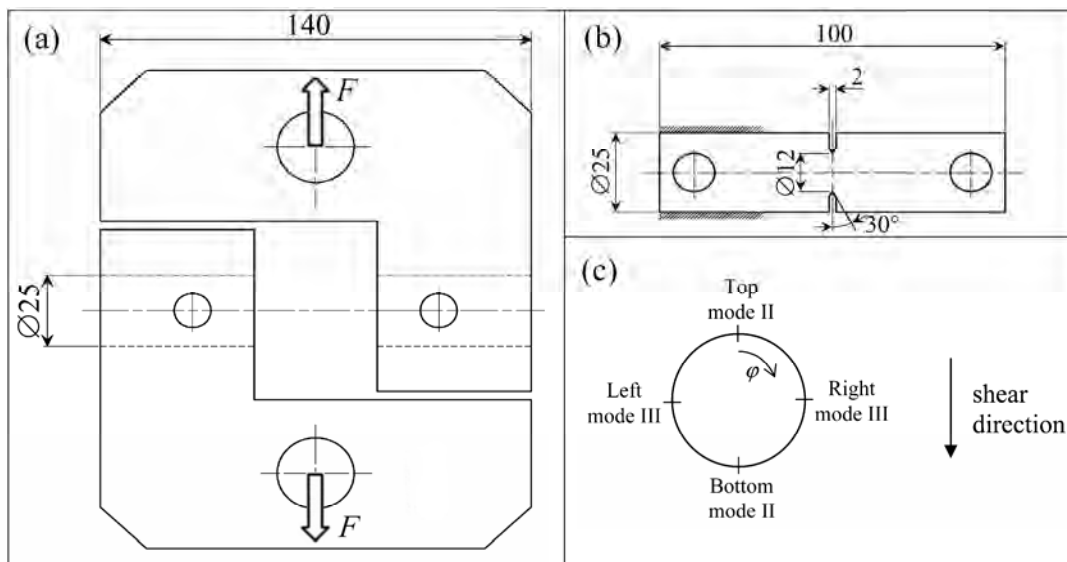
Tanaka [5] srovnával chování únavových trhlín ve feritické a austenitické oceli na válcových vzorcích s obvodovým vrubem zatěžovaných v krutu. U feritické oceli bylo šíření trhlín v módu III převážně ve smykové rovině, zatímco u austenitické oceli se trhliny větily do módu I a vytvářely složitou geometrii lomových ploch. To způsobilo u austenitické oceli mnohem delší životnost než u feritické oceli. V případě ostrého vrubu byla u austenitické oceli životnost dokonce delší než u mělkého vrubu, což bylo způsobeno velkým gradientem napětí v blízkosti ostrého vrubu v kombinaci se složitou geometrií lomových ploch. Jednalo se o paradoxní jev zpevňujícího účinku vrubu.

Dále jsou prezentovány výsledky z experimentů, které byly získány především z měření prostorové morfologie lomových ploch vzniklých zatěžováním v módech II a III a měřením efektivních prahových hodnot pro šíření těchto trhlín. Byla použita tři experimentální schémata.

První schéma experimentu bylo tvořeno zatěžováním vzorků CTS („compact-tension shear“) ve smyku (Obr. 2). Trhlina zde byla zatěžována v čistém módu II. Druhým experimentem bylo zatěžování válcových vzorků s obvodovou trhlinou v krutu (čistý mód III). Poslední schéma (Obr. 3) je nesymetrický čtyřbodový ohyb válcového vzorku s obvodovou trhlinou, ve kterém je uprostřed nulový ohybový moment, průřez je zatěžován pouze smykovým napětím a trhlina je po obvodu zatěžována různou kombinací módů II a III.



Obr. 2: Experiment pro zatížení trhliny v módu II, (a) vzorek CTS s vrubem a iniciační trhlinou, (b) uchycování přípravek.



Obr. 3: Experiment pro zatížení obvodové trhliny válcového vzorku kombinací módů II a III, (a) uchyvací přípravek, (b) válcový vzorek s obvodovým vrubem a iniciační trhlinou, (c) příčný průřez vzorku v místě vrubu a odpovídající módy zatížení trhliny v přítomnosti smykového napětí.

Stínící efekty byly eliminovány jednak zvláštním způsobem vytváření iniciační trhliny v tlaku, po kterém zůstala trhlina mírně otevřená a nedocházelo pak k interakci mezi lomovými plochami, a jednak žíháním vzorků ve vakuu. Byly zvoleny jednofázové kovové materiály, které mají dostatečně jednoduchou strukturu na to, aby bylo možné výsledky srovnávat s teorií.

Srovnání módů II a III a různých kovových materiálů

Fyzikální zdůvodnění rozdílného chování u různých typů materiálů je v případě trhlin zatěžovaných v módech II a III v rozdílnosti krystalových mřížek. Různý počet skluzových rovin a úhlů mezi nimi určuje mechanismus, kterým dochází na čela trhliny k cyklické plastické deformaci. Jestliže je k dispozici dostatek skluzových rovin, mezi nimiž je malý úhel, budou se z čela trhliny emitovat dislokace v rovině maximálního smyku a v rovinách jen mírně od ní odkloněných. Materiál se tedy bude porušovat ve smyku a směr šíření trhlin v módech II a III bude zůstat okolo roviny smyku. Vzhledem k aktivaci konkrétních skluzových systémů v každém zrně lze pak na lomových plochách pozorovat krystalografické fasety.

V materiálu, který má strukturu s velkými úhly mezi skluzovými rovinami, je obtížné nalézt vhodně orientovanou skluzovou rovinu, kde by docházelo k emisi dislokací z čela trhliny, protože pod větším úhlem sklonu výrazně klesá složka smykového napětí. Uplatní se tedy jiný mechanismus, při kterém čelo trhliny absorbuje dislokace přicházející z náhodných směrů a při tom dochází k malým poskokům trhliny. Tyto poskoky se nejefektivněji uskuteční ve směru kolmém na maximální tahové napětí, protože dochází k lokální dekohezi materiálu. Trhlina proto bude mít tendenci se odklánět nebo stáčet do lokálního otevíracího módu I a tím komplikovat lomovou plochu. Tento způsob šíření probíhá stejně ve všech zrnech bez ohledu na jejich orientaci, a proto na lomových plochách nejsou krystalografické fasety. Prahová hodnota pro šíření trhliny je u takového materiálu vyšší než v případě prvního modelu.

V následující tabulce je srovnání kovů s různými krystalovými mřížkami a z toho plynoucími sadami dostupných skluzových rovin. V návaznosti na to je pak uvedeno chování trhlin zatěžovaných v módech II a III.

Tabulka 1. Srovnání kovů s různými krystalovými mřížkami s ohledem na chování trhlin v módech II a III.

materiál	krystal	skluzové roviny	porušení	lomové plochy
feritická ocel	BCC	malé úhly	maximálním smykem	rovné, malé stínění
titan	HCP	středně velké úhly	kombinace	kombinace
nikl	FCC bez vrstevných chyb	velké úhly, možný příčný skluz	kombinace	kombinace
austenitická ocel	FCC s vrstevnými chybami	velké úhly, nemožnost příčného skluzu	maximálním tahem	drsňé, velké stínění v módu III

Efektivní prahové hodnoty

V tabulce 2 jsou uvedeny efektivní prahové hodnoty pro módy I, II a III. Hodnoty pro módy I a II jsou v souladu s předpověďmi teorie založené na pohybech dislokací a základních vlastnostech krystalů kovů (modul pružnosti a velikost burgersova vektoru). Šíření trhlin s dokonale rovným čelem v čistém módu III teoreticky není možné, protože poškození materiálu nevzniká cyklicky ve směru šíření trhliny, ale pouze kolmo na něj. Avšak reálné trhliny zatěžované v módu III jsou křivolaké a lokálně se šíří po segmentech v módech I a II. Průmět vnějšího zatížení (mód III) do lokálních módů I a II na jednotlivých segmentech čela trhliny znamená snížení efektivního zatížení. To vysvětluje vyšší efektivní prahové hodnoty v módu III než v módu II, systematicky pro všechny studované materiály. Také rychlosti šíření trhlin v módu III jsou pomalejší než v módu II.

Tab. 2: Efektivní prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí pro vybrané kovové materiály v módech I, II a III [4,6,7].

materiál	efektivní prahové hodnoty $\Delta K_{th,eff}$ [MPa·m ^{1/2}]				
	mód I		mód II		mód III
	teorie	experiment	teorie	experiment	experiment
feritická ocel	2,5	2,7	1,4	1,5	2,6
titan	2,0	2,0	1,7	1,7	2,8
nikl	2,3	2,3	3,1	2,9	4,3
austenitická ocel	2,5	2,3	2,5	2,5	4,2

Závěr

Zatížení trhliny, zejména v oblasti prahových hodnot, je potřeba rozdělit na efektivní složku, která je vlastní hnací silou pro šíření trhliny, a na stínící složku, která odpovídá okolním vlivům jako např. kontakt mezi lomovými plochami. Blízko prahové oblasti může být stínící složka i několikanásobně větší než efektivní složka. Efektivní prahové hodnoty byly zjištěny experimentálně pro několik kovových materiálů s jednoduchou mikrostrukturou a v souladu s teoretickými modely se ukázalo, že šíření únavových trhlin v módu II je rychlejší než v módu III. Výsledky experimentů dále ukázaly, že v různých materiálech mají lomové plochy různou prostorovou členitost, což má zásadní vliv na stínící složku. Tyto rozdíly lze vysvětlit pomocí krystalové struktury materiálů.

Poděkování

Práce byla podpořena a financována projektem specifického výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně s označením FSI-J-13-2121.

LITERATURA

- [1] Klesnil M, Lukáš P. *Fatigue of Metallic Materials*. Amsterdam: Elsevier; 1992.
- [2] Pokluda J., Šandera P. (2010). *Micromechanisms of Fracture and Fatigue; In a Multiscale Context*. Springer, London.
- [3] Vojtek T., Pokluda J., Hohenwarter A., Pippan R. (2013) Three-dimensional Morphology of Fracture Surfaces Generated by Modes II and III Fatigue Loading in Ferrite and Austenite. *Engineering Fracture Mechanics* 10, 285–293.
- [4] Vojtek T, Pippan R., Hohenwarter A., Holáň L. a Pokluda J. (2013) Near-threshold propagation of mode II and mode III fatigue cracks in ferrite and austenite. *Acta Materialia* 61, 4625–4635
- [5] Tanaka K. (2012) Small Crack Propagation in Multiaxial Notch Fatigue. In: Carpinteri A, Iacoviello F, Pook LP, Susmel L (editoři). *Crack Paths (CP 2012)*, Gaeta, Italy, p. 31–45.
- [6] Pippan, R. (1991) Threshold and effective threshold of fatigue crack propagation in ARMCO iron. I: The influence of grain size and cold working. *Material Science and Engineering*. A138, 1–13.
- [7] Irwing, P. E., Robinson J.L., Beevers C. J. (1973) Fatigue crack closure in titanium and titanium alloys. *International Journal of Fracture* 9, 105–108.